

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EMULÁTOR SENZOROVÝCH ZAŘÍZENÍ PRO PRŮMYSLOVÉ SÍTĚ

SENSOR DEVICES EMULATOR FOR INDUSTRIAL NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Malček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Blažek

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Ladislav Malček

ID: 211264

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Emulátor senzorových zařízení pro průmyslové sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je realizace HW/SW emulátoru koncových zařízení v systémech provozních (operačních) technologií. Provedte analýzu koncových zařízení nacházejících se v systémech z průmyslového odvětví, na základě kterých definujte možné vstupní a výstupní signály (např. snímání 3fázový sinusový signál, binární hodnoty ovládající relé, snímání stavů na vstupu zařízení a další). Navrhněte a realizujte zařízení tak, aby se tyto simulované signály blížily reálným hodnotám. Simulované hodnoty bude možné generovat náhodně z definovaného rozsahu a nebo načítat ze souboru (např. *.csv, *.txt a další). Dílčí částí práce bude webové a terminálové rozhraní, kde bude možné nastavit simulované hodnoty na jednotlivých vstupech včetně stavů vyvolávacích kritické hodnoty (např. přepětí, zkrat, zvýšená teplota, překročení otáček motoru a další). Výstupem bakalářské práce bude návrh a realizace alespoň šesti zařízení a funkční ovládací webové a terminálové rozhraní.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MONK, S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches, 1. vyd. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [2] MANN, B. C pro mikrokontroléry. BEN - technická literatura, Praha 2003.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Petr Blažek

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Úlohou bakalárskej práce je návrh a realizácia emulátora senzorových zariadení pre priemyselné siete. V prvej časti práca rozoberá energetickú sieť, zásady jej bezpečnosti a kontroly. Následne sú opísané meracie senzory pre meranie napätia a prúdu, vyhodnocovacie zariadenie na spracovávanie a vyhodnocovanie dát zo senzorov a zariadenia na ochranu siete. Ďalej je opísaný použitý mikrokontrolér a všetky použité komponenty. V druhej časti je rozpracovaný návrh samotného emulátoru na základe vybraného snímacieho senzoru. Výsledkom sú vytvorené obvody pre simuláciu trojfázového napätia, trojfázového prúdu a binárnych digitálnych výstupov, simulujúce senzory v priemyselných sieťach. Dielčou časťou práce je vytvorenie ovládacieho terminálu a ovládacieho webového rozhrania pre nastavovanie simulovaných hodnôt používateľom. Emulátor je po fyzickom vyhotovení testovaný na kontrolnom zariadení. V poslednej časti práce sú prezentované výsledky testov emulátora.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

priemyselná sieť, emulátor, senzory napätia, senzory prúdu, vyhodnocovacie zariadenia, binárne hodnoty, mikrokontrolér, ovládacie rozhranie

ABSTRACT

The task of bachelor thesis is design of sensor devices emulator for industrial networks. Subject of the first part is description, safety and control of electric network. Afterwards the current and voltage sensors and merging units for analysis of data are presented, followed by description of the used microcontroller, and all the individual components of simulator. In the next part the design of circuits for voltage, current and binary outputs is presented. The third part of thesis are designs of control terminal and web interface for setting of simulated values by user. After physical realization of emulator, it was tested on a control device. The last part of the thesis are results of testing.

KEYWORDS

industrial network, emulator, voltage sensors, current sensors, control units, binary values, microcontroller, control interface

MALČEK, Ladislav. *Emulátor senzorových zařízení pro průmyslové sítě*. Brno, 2021, 70 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Petr Blažek

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Emulátor senzorových zařízení pro průmyslové sítě“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petru Blažekovi za metodickú, odbornú pomoc, konzultácie a trpezlivosť pri návrhu a realizácii bakalárskej práce.

Obsah

Úvod	12
1 Energetická sieť a možnosti jej kontroly	13
1.1 Kvalita napätia v rozvodnej sústave	13
1.2 Prúdové a napäťové senzory	14
1.2.1 Kombinovaný senzor pre vnútorné prostredie KEVCD	15
1.2.2 Senzor KEVCD A	16
1.3 Vyhodnocovacie zariadenia	17
1.3.1 ABB REF 615 IEC	17
1.3.2 Program PCM600	19
1.3.3 Program Wavewin ABB	19
1.4 Zariadenia na ochranu siete	20
1.4.1 Prúdový chránič	20
1.4.2 Istič	20
1.4.3 Vysokonapäťové odpínače	21
1.4.4 Uzemňovače	21
2 Hardware	22
2.1 Arduino	22
2.1.1 Arduino Nano	23
2.1.2 Ďalšie možnosti využitia platformy Arduino	24
2.2 Operačný zosilňovač	24
2.3 Digitálny potenciometer	25
2.4 Sériovo-paralelný posuvný register	26
3 Návrh emulátoru a jeho komponentov	27
3.1 Generovanie sínusového signálu	28
3.1.1 Pulse Width Modulation	28
3.1.2 Generovanie PWM signálu	29
3.2 Trojfázové napätie	30
3.2.1 Nastavenie veľkosti simulovaného napätia	33
3.3 Trojfázový prúd	34
3.3.1 Nastavenie veľkosti simulovaného prúdu	35
3.4 Simulácia digitálnych binárnych výstupov	35
3.4.1 Implementácia funkcie <i>shiftOut()</i>	35
3.4.2 Test modulu pre nastavenie binárnych výstupov	36
3.5 Návrh ovládacej jednotky	39

3.5.1	Zdrojový kód ovládacej jednotky	39
3.6	Napájací zdroj	43
4	Komunikačné rozhrania	44
4.1	Komunikačný reťazec	44
4.2	Simulácia scenárov	45
4.3	Terminálové rozhranie	46
4.4	Webové rozhranie	47
5	Výsledky simulácií	51
5.1	Simulácia prúdového a napätového transformátoru	51
5.1.1	Normálna prevádzka	52
5.1.2	Skrat fázy	53
5.1.3	Podpätie a prepätie	54
5.1.4	Pokles a nárast frekvencie	54
5.2	Simulácia zariadení	55
5.2.1	Odpojovač	56
5.2.2	Istič	56
5.2.3	Podvozok ističa	57
5.2.4	Zemná ochrana	58
	Záver	59
	Literatúra	60
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	62
	Zoznam príloh	64
A	Obsah priloženého súboru	65
B	Dosky plošných spojov	66
B.1	Zosilňovací stupeň	66
B.2	Modul výstupných binárnych hodnôt	66
B.3	Riadiaca jednotka	67
C	Fotodokumentácia	68

Zoznam obrázkov

1.1	Schéma Rogowského cievky	16
1.2	Kombinovaný senzor KEVCD A	17
1.3	ABB REF 615	18
1.4	VN odpínač	21
1.5	Uzemňovač EK6	21
2.1	Verzie platformi Arduino	22
2.2	Vstupy a výstupy Arduina Nano	24
2.3	Digitálny potenciometer	25
2.4	Posuvný register 74HC595N	26
3.1	Bloková schéma emulátora	28
3.2	Príklad PWM signálu	29
3.3	Priebeh sínusového signálu generovaný mikrokontrolérom	30
3.4	Bloková schéma obvodu simulujúceho napätie	31
3.5	Schéma zapojenia modulu zosilňovacieho stupňa	32
3.6	Simulácia výstupnej hodnoty napätia - spodná hranica	33
3.7	Simulácia výstupnej hodnoty napätia - horná hranica	33
3.8	Bloková schéma obvodu simulujúceho prúd	34
3.9	Test modulu binárnych výstupov	36
3.10	Schéma tranzistorového spínača	37
3.11	Schéma zapojenia modulu binárnych výstupov	38
3.12	Bloková schéma zdrojového kódu	40
3.13	Schéma zapojenia ovládacej jednotky - prvý list	41
3.14	Schéma zapojenia ovládacej jednotky - druhý list	42
3.15	Schéma napájacieho zdroja	43
4.1	Ukážka scenáru	46
4.2	Ovládací terminál	47
4.3	Ukážka domovskej karty webového rozhrania	48
4.4	Ovládanie stavov fáz	49
4.5	Ovládanie binárnych hodnôt	49
4.6	Ovládanie zariadení pomocou webového rozhrania	50
5.1	Diagram znázorňujúci fázory	52
5.2	Normálna prevádzka siete	52
5.3	Skrat prvej fázy	53
5.4	Odpojenie prvej fázy	53
5.5	Prepätie prvej fázy	54
5.6	Polohy nastavenia frekvencie	55
5.7	Indikácia polôh ističa	57

5.8	Indikácia polôh podvozku ističa	57
5.9	Indikácia polôh uzemňovača	58
B.1	Osadzovací výkres zosilňovacieho stupňa	66
B.2	Strana spojov zosilňovacieho stupňa	66
B.3	Osadzovací výkres modulu binárnych hodnôt	66
B.4	Strana spojov TOP modulu binárnych hodnôt	66
B.5	Strana spojov BOT modulu binárnych hodnôt	66
B.6	Osadzovací výkres riadiacej jednotky	67
B.7	Strana spojov TOP riadiacej jednotky	67
B.8	Strana spojov BOT riadiacej jednotky	67
C.1	Doska plošných spojov - riadiaca jednotka	68
C.2	Doska plošných spojov - riadiaca jednotka, druhý pohľad	68
C.3	Doska plošných spojov - zosilňovač simulovaného napätia	69
C.4	Doska plošných spojov - zosilňovač simulovaného prúdu	69
C.5	Doska plošných spojov - binárne výstupy	69
C.6	Napájací zdroj	70
C.7	Zapojenie pracoviska	70

Zoznam tabuliek

1.1	Dovolené napäťové rozsahy pre rozvodné siete.	14
1.2	Dovolené frekvenčné rozsahy.	14
1.3	Parametre napäťového senzoru	16
1.4	Parametre prúdového senzoru	17
1.5	Štandardné zapojenie binárnych vstupov	19
5.1	Pripojenie binárnych vstupov REF 615 na emulátor	56

Zoznam výpisov

3.1	Implementácia funkcie <i>shiftOut()</i>	36
4.1	Príklad dátového reťazca.	45

Úvod

Hlavnou témou bakalárskej práce je štúdia energetickej a priemyselnej siete z hľadiska jej vlastností, možností kontroly, riadenia a ochrany. Vývoj prístrojov pre monitorovanie sietí sa stáva čoraz potrebnější pre celý energetický priemysel. Používanie monitorovacích zariadení v priemyselnom odvetví je takisto neoddeliteľnou súčasťou správne fungujúceho systému. V priemysle sa nasadzujú kontrolné a dohľadové systémy, optimalizované pre bezpečnú priemyselnú výrobu.

Testovanie zariadení pre priemyselné použitie, ktoré zhromažďujú a vyhodnocujú signály z rôznych senzorov a meracích transformátorov, je náročné realizovať na konkrétnych priemyselných prístrojoch. V školských podmienkach je takmer nemožné väčšinu zariadení mať fyzicky na pracovisku, najmä kvôli vysokým počiatočným nákladom, skladovacím kapacitám, zložitej obsluhu a bezpečnostným štandardom. Veľa senzorov z priemyselného prostredia nie je nutné mať fyzicky na pracovisku, pretože veľa z nich využíva podobný princíp fungovania, je však potrebné im vhodným spôsobom porozumieť.

Pri znalosti výstupov zariadení, napríklad meracích napäťových a prúdových transformátorov, prevodových transformátorov, snímačov koncových polôh v priemysle, váhových senzorov, zariadení na meranie frekvencie, by bolo možné tieto signály simulovať s dostatočnou presnosťou a vytvoriť zariadenie práve na účel simulovania signálov a javov spojených s prevádzkou reálnych zariadení. S emulátorom priemyselnej siete, by bolo oveľa jednoduchšie testovať priemyselné zariadenia na monitorovanie stavu siete. Pri prevádzke sa na priemyselných zariadeniach vyskytuje množstvo porúch typu výpadku fázy, skratu, podpätia alebo prepätia.

Obsahom bakalárskej práce je v prvej časti opis senzorov, kontrolných zariadení a zariadení na ochranu siete. Nasleduje návrh a analýza obvodov na simuláciu trojfázového napätia, prúdu a digitálnych binárnych výstupov. Návrh obvodov je potom použitý na fyzickú realizáciu prístroja na simulovanie trojfázovej siete. Ďalšou časťou je návrh a realizácia ovládacích terminálov cez sériové a webové ovládacie rozhranie. Poslednou časťou je testovanie vlastností emulátoru a návrh scenárov prevádzky siete.

1 Energetická sieť a možnosti jej kontroly

Kapitola 1 je spracovaná na základe dokumentu [1]. Energetická sieť musí byť tvorená niekoľkými na sebe závislými časťami, aby bola zabezpečená jej správna funkcia a ochrana užívateľov. Základnou časťou, ktorá umožňuje ďalšie spracovávanie a poskytuje ostatným systémom informácie, je časť meracích zariadení. Zariadenia merajú aktuálny stav veličín v sieti. Využívajú sa meracie prúdové transformátory a napäťové transformátory, ktoré transformujú prúd a napätie na úrovne prijateľné pre meraciu logiku. Ďalej sa sleduje frekvencia harmonického napätia, výkony na záťažach a vyhodnocuje sa účinnosť elektrickej siete.

Hodnoty získané meraním sú monitorované ochranných a kontrolným systémom. V kontrolných systémoch sa uplatňujú monitorovacie a alarmové panely a SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) dohľadové systémy. Ochranné a kontrolné systémy sú ďalej napojené na primárnu rozvodnú sieť, kde ovládajú ističe, prúdové chrániče a stýkače.

Ochranné systémy sú používané na identifikáciu chýb a porúch v elektrickom systéme a ich rýchlej izolácií, kedy ponechávajú čo najväčšiu časť siete bez chyby pripojenú. Čím dlhšie zostáva chyba v elektrickom systéme, zväčšuje sa týmto javom možné nebezpečenstvo a poškodzuje sa fungujúci systém, môže kolabovať a poškodzovať aj správne fungujúcu časť siete. Kvôli týmto dôsledkom je nutné sieť nepretržite monitorovať a predchádzať zničeniu väčšej časti siete pri vzniku poruchy.

1.1 Kvalita napätia v rozvodnej sústave

V rozvodných sieťach je definovaná kvalita napätia, ktorá je jedným zo štandardov kvality dodávok elektriny. Kvalita je stanovená radou parametrov, napr. kmitočet siete, veľkosť napájacieho napätia, nesymetria siete, atď. Pri návrhu emulátoru sa bude z týchto definovaných parametrov vychádzať pri návrhu napäťového transformátoru pre priemyselnú sieť. Ako menovitá hodnota napätia bola vybraná hodnota 22 kV, ktorá spadá do kategórie vysokého napätia. Emulátor musí byť schopný emulovať prekročenie napäťového a frekvenčného rozsahu, aby bolo možné vzniknutý stav vyhodnotiť kontrolným zariadením, pretože v skutočnej prevádzke dochádza k poruchovým stavom. Pri návrhu bol braný do úvahy dovolený frekvenčný rozsah pre 100-percentnú dobu prevádzky, pre napäťový rozsah bolo vychádzané z 99-percentnej doby prevádzky. V tabuľke 1.1 sú uvedené dovolené rozsahy napätia pre rozvodné siete a v tabuľke 1.2 sú uvedené frekvenčné rozsahy pre energetickú sieť. [2]

Tab. 1.1: Dovoľené napäťové rozsahy pre rozvodné siete, dostupné z [2].

Sieť	Dovoľený rozsah	Napäťový rozsah
230 V	230 V $\pm 10\%$	207 - 253 V
22 kV	22 V $\pm 10\%$	19,8 - 24,2 kV
110 kV V	110 kV $\pm 10\%$	99 - 121 kV
220 kV	220 kV $\pm 10\%$	198 - 242 kV
400 kV	400 kV $\pm 5\%$	380 - 420 kV

Tab. 1.2: Dovoľené frekvenčné rozsahy, dostupné z [2].

Doba prevádzky	Dovoľený rozsah	Frekvenčný rozsah
99,5%	50 Hz $\pm 1\%$	49,5 - 50,5 Hz
100%	50 Hz +4%/-6%	47 - 52 Hz

1.2 Prúdové a napäťové senzory

Prvým problémom kontroly a monitorovania siete je získavanie informácií o aktuálnom stave siete. Problém merania elektrických veličín spočíva v ich vysokej hodnote. V rozvodných sieťach sa kvôli vysokým stratám na vedení pri distribúcii elektrickej energie musí používať veľmi vysoké napätie. Typicky ide o napätie s hodnotami od 12 do 400 kV. Vysoká hodnota napätia znemožňuje vykonávať meranie priamo elektrickým prístrojom, musí byť vhodným spôsobom transformovaná na nižšie napätie s preddefinovaným transformačným pomerom. Upravená hodnota napätia už môže byť ďalej spracovaná a vyhodnotená. Podobne sa musí zaobchádzať aj s elektrickým prúdom, ktorý nadobúda vysoké hodnoty.

Konvenčné prístrojové transformátory sa používajú vo vysokonapäťových sieťach na prevod veľmi vysokého napätia a prúdu na úroveň vhodnú pre ochranu a meranie. Senzory používajú nové digitálne technológie pre meranie a ochranu, splňajú kompletne nové požiadavky na konvenčné prístrojové transformátory. [3]

Firma ABB má vo svojej ponuke prúdové senzory, napäťové senzory a kombinované senzory umožňujúce meranie napätia aj prúdu. V bakalárskej práci sa pri návrhu a tvorbe emulátora elektrickej siete bude postupovať podľa vzoru kombinovaných senzorov KEVCD pre zber dát o stave napätia a prúdu, ako univerzálny prípad použitia senzorov v sieti. Simulované signály sú ďalej upravené pre potreby simulácie.

1.2.1 Kombinovaný senzor pre vnútorné prostredie KEVCD

Podkapitola 1.2.1 je pracovaná na základe podkladov [4]. Senzor pre vnútorné použitie s funkciou merania prúdu a napätia. Rada zariadení je určená na napäťové a prúdové merania pre použitie vo vzduchom izolovaných sieťach nízkych napätí. Meranie v napäťových senzorech je založené na princípe odporového alebo kapacitného deliča, kde je výstupné napätie priamo úmerné vstupnému napätiu. Sensory netrpia problémami s nasýtením jadra a sú lineárne v celom meracom rozsahu. Napätie výstupu odporového deliča je definované podľa vzorca:

$$U_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_p, \quad (1.1)$$

kde U_s predstavuje sekundárne napätie, U_p predstavuje primárne napätie a R_1 , R_2 sú odpory deliča. Vo všetkých prípadoch senzor reprodukuje aktuálny časový priebeh tvaru vlny primárneho napätia.

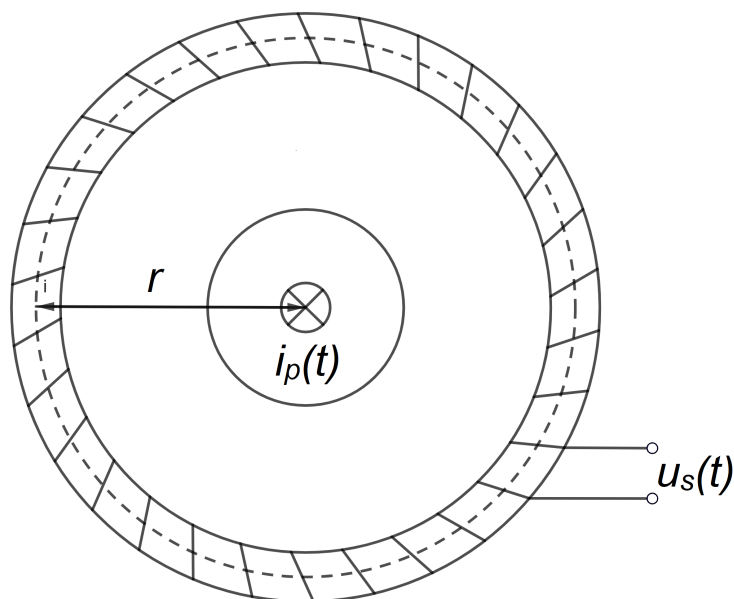
Prúdový senzor je založený na princípe Rogowského cievky. Rogowského cievka je toroidná cievka navinutá na nemagnetickom jadre umiestnená okolo primárneho vodiča, na ktorom sa vykonáva meranie. Cievka nemá feromagnetické jadro z dôvodu imunity voči nasýteniu v celom meracom rozsahu. Výstupným signálom je napätie, ktoré je priamo úmerné časovej derivácii prúdu, definované podľa vzorca:

$$u_s(t) = M \frac{di_p(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

kde $u_s(t)$ predstavuje sekundárne napätie indukované v cievke, konštanta M predstavuje vzájomnú indukčnosť cievok a zlomok $\frac{di_p(t)}{dt}$, predstavuje časovú deriváciu primárneho prúdu prechádzajúceho vodičom. Schéma Rogowského cievky je zobrazená na obrázku 1.1.

Prúdový senzor je možné použiť v meraciach aj istiacich aplikáciách, pri bezpečnostných účeloch je nutné pomocou digitálnej integrácie napätia získať spätné hodnotu prúdu. Tvar signálu reprodukuje tvar vlny prijímaného signálu.

Vlastnosti kombinovaného senzoru patrí vysoká presnosť, vysoká lineárnosť, široké dynamické rozpätie, senzory sú nesaturovatelné. Transformačné pomery pre konkrétne zariadenia sa líšia v závislosti od konkrétneho modelu zariadenia. Všetky typy senzorov sa pripájajú k ochranným zariadeniam pomocou ethernetových káblov s konektormi typu RJ-45.



Obr. 1.1: Schéma Rogowského cievky.

1.2.2 Senzor KEVCD A

Typová rada KEVCD A umožňuje kombinované meranie napätia a prúdu pomocou spomenutých spôsobov. Pri návrhu emulátoru sa primárne vychádza z transformačných pomerov, údajov a charakteristík rady KEVCD. Nižšie v tabuľke 1.3 a tabuľke 1.4 sú uvedené parametre ako menovité napätia, transformačný pomer, prúdový pomer a maximálna záťaž nepretržitého tepelného prúdu, z ktorých sa bude vychádzať pri návrhu obvodov pre simuláciu napätia a prúdu. Puzdro a prevedenie senzoru je vidieť na obrázku 1.2.

Tab. 1.3: Parametre napäťového senzoru, dostupné z [4].

Názov	Značka	Menovitá hodnota
Menovitá frekvencia	F_n	50/60 Hz
Trieda presnosti	T_P	0,5/3P
Menovitá záťaž	R_{br}	10 M
Transformačný pomer	K_n	10 000:1
Napäťový faktor	K_u	1,9/8 h

Tab. 1.4: Parametre prúdového senzoru, dostupné z [4].

Názov	Značka	Menovitá hodnota
Menovitý primárny prúd	I_{pr}	80 A
Transformačný pomer pre 50 Hz	K_{ra}	80 A/0,150 V
Transformačný pomer pre 60 Hz	K_{ra}	80 A/0,180 V
Menovitý nepretržitý tepelný prúd	I_{cth}	1 250 A
Menovitý nárazový tepelný prúd	I_{th}	50 kA/1 s



Obr. 1.2: Kombinovaný senzor KEVCD A, prevzaté z [4].

1.3 Vyhodnocovacie zariadenia

Vyhodnocovacie zariadenia slúžia na zber a analýzu dát z meracích senzorov. V bakalárskej práci je konkrétnejšie spomenuté zariadenie od firmy ABB s označením REF 615 IEC, pretože emulátor bude testovaný na tomto zariadení.

1.3.1 ABB REF 615 IEC

Zariadenie s označením REF 615 IEC je určené na ochranu vedenia, kontrolu bezpečnostných spínačov, meranie a dohľad nad napäťovými vedeniami v úžitkových a priemyselných distribučných systémoch. Vyhodenie zariadenia je zobrazené na obrázku 1.3. Do týchto systémov spadajú centrálné, okruhovú a mriežkovité distribučné siete. Taktiež to môžu byť siete bez decentralizovanej výroby energie, ako aj s centralizovanou výrobou energie. [5]

Pripojenie snímačov trojfázového napätia a prúdu sa realizuje pomocou káblov s konektormi typu RJ-45. Vstupy pre jednotlivé fázy majú označenie X131, X132,

X133. Rovnako je možné k zariadeniu pripojiť nulový vodič na vstup X130. Binárne výstupy zariadenia sa pripájajú na skrutkovitú svorkovnicu X100. Jednotlivé očíslované svorky slúžia na pripojenie konkrétnych senzorov ako napríklad indikácia zapnutej/vypnutej polohy vypínača, indikácia nízkeho tlaku plynu vypínača, alebo indikácia zapnutej/vypnutej polohy uzemňovača. Merané hodnoty sa zobrazujú na displeji zariadenia. V základnom meraní sa vyhodnocuje napätia a prúd jednotlivých fáz, frekvencia trojfázového signálu a výkony. Pre komunikáciu so zariadením sa používa program PCM600, opísaný v časti 1.3.2. Pre zobrazenie záznamov, ktoré zaznamenáva zariadenie REF615 je použitý program Wavewin ABB, ktorého použitie je opísané v časti 1.3.3.



Obr. 1.3: ABB REF 615, prevzaté z [5].

Štandardná konfigurácia G

Štandardná konfigurácia G je určená pre nadprúdové smerové a zemné smerové chránenie s meraním fázového napätia, s podpäťovou aj prepäťovou ochranou so vstupmi pre meranie signálov prúdových a napäťových senzorov. Konfigurácia je predovšetkým pre aplikácie káblového vývodu nadzemného vedenia v účinne alebo odporovo uzemnených distribučných sieťach. Okrem pripojenia napäťových a prúdových senzorov je možné v konfigurácii G pripojiť na kontrolné zariadenie aj binárne senzory. Zoznam pripojených zariadení na jednotlivé vstupy kontrolného zariadenia je popísaný v tabuľke 1.5. Väčšina funkcií pre návrh emulátoru je prevzatá z konfigurácie G. Na jej základe sa pripravovali aj scenáre v ovládacích rozhraniach. Pripojenie senzorových zariadení a výsledky simulácií sú opísané v kapitole 5. [6]

Tab. 1.5: Štandardné zapojenie binárnych vstupov, dostupné z [6].

Binárny vstup	Štandardné použitie	Špičky konektoru X110
X110 - BI1	Indikácia zapnutej polohy ističa	1,2
X110 - BI2	Indikácia vypnutej polohy ističa	3,4
X110 - BI3	Indikácia nízkeho tlaku plynu ističa	5,6
X110 - BI4	Indikácia natiahnutej pružiny ističa	7,6
X110 - BI5	Indikácia zasunutého podvozku ističa	8,9
X110 - BI6	Indikácia vysunutého podvozku ističa	10,9
X110 - BI7	Indikácia zapnutej polohy uzemňovača	11,12
X110 - BI8	Indikácia vypnutej polohy uzemňovača	13,12

1.3.2 Program PCM600

V ovládacom programe je možné zachytávať hlásenia vytvorené zariadením, sledovať aktuálny stav siete a monitorovať stav pripojených zariadení. Program sa dá rovnako použiť na sledovanie stavov binárnych vstupov.

Zariadenie sa pripojuje do počítača pomocou ethernetového kábla, cez ktorý prebieha prenos dát od zariadenia do grafického rozhrania. Pre spoľahlivý prenos komunikácie je nastavený rovnaký technický kľúč v zariadení aj v počítačovom programe. Grafické rozhranie programu umožňuje zobrazenie aktuálnych meraných hodnôt, zobrazenie záznamov o meraní a chybách, aktuálny stav binárnych vstupov do zariadenia. Program je v bakalárskej práci používaný na záznam meraní zariadenia a overenie funkcie emulátora, výsledky simulácií sú popísané v kapitole 5.

1.3.3 Program Wavewin ABB

Program Wavewin ABB slúži na zobrazenie reálnych priebehov meraných veličín zaznamenaných pomocou zariadenia REF615. Grafické okno programu zobrazuje priebehy jednotlivých fázových napätí a prúdov. Záznamy o meraní je možné exportovať do formátu CSV. Program sa používa pre zobrazenie výsledkov získaných pomocou kontrolného zariadenia, výsledky a ukážka grafického prostredia sú popísané v kapitole 5.

1.4 Zariadenia na ochranu siete

V tejto podkapitole sú opísané zariadenia na ochranu siete, ktoré sa dajú využiť pri návrhu emulátora. Patria sem zariadenia na automatické odpojenie od zdroja a uzemňovače.

Automatické odpojenie od zdroja zabráňuje vzniku úrazu v prípade poruchy elektrického zariadenia. Automatickým odpojením sa rozumie použitie určitého zariadenia, ktorý vykoná odpojenie v prípade vzniku poruchového stavu, toto odpojenie musí byť dostatočne rýchle. [7]

Z hľadiska využitia kontrolného zariadenia na monitorovanie prevádzky siete je možné na jeho binárne vstupy pripojiť kontakty ochranných zariadení siete. Tieto kontakty slúžia na indikovanie stavu ochranného zariadenia. Zariadenie je v normálnom režime alebo došlo k prekročeniu menovitých hodnôt napätia a zariadenie splnilo svoju ochrannú funkciu, a tento stav je indikovaný na výstupnom kontakte zariadenia. Týmto spôsobom je možné získať lepšiu predstavu o dianí v sieti.

Výstupné kontakty budú nahradené výstupným modulom emulátora, ktorý slúži na nastavenie binárnych hodnôt. Ten bude pomocou ovládacích rozhraní simulovať stavy zariadení.

1.4.1 Prúdový chránič

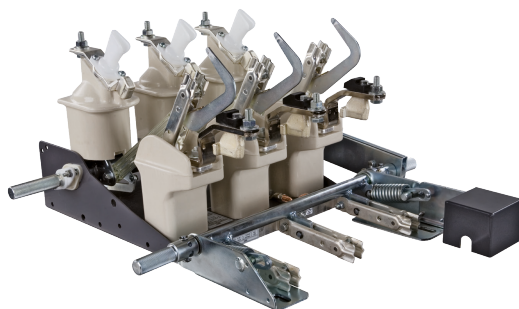
Prúdový chránič je ochranný prístroj pre automatické odpojenie v prípade poruchy. Nevýhoda ochrany prúdovým chráničom spočíva v prípade vzniku nadprúdu. Vypína však už aj pri malých prúdoch, zabráňuje teda vzniku požiaru. Základný komponent prúdového chrániča je súčtový transformátor, ktorým musia prechádzať všetky pracovné vodiče. Pri normálnej funkcii pre súčet aktuálne prechádzajúceho prúdu cez transformátor rovný nula, rovnako aj magnetický indukčný tok v jadre transformátoru je nulový, preto sa v sekundárnom vinutí neindukuje žiadne napätie. Ak dôjde v chránenom obvode k úniku prúdu, napríklad dotykom osoby, vznikne medzi porovnávanými prúdmi rozdiel. Ak tento rozdiel prekročí hodnotu menovitého rozdielového prúdu, spôsobí prúd naindukovaný v sekundárnom vinutí vypnutie vypínacieho relé a odpojenie chráneného obvodu. [7]

1.4.2 Istič

Istič bol primárne vyvinutý ako náhrada poistky, s výhodou opätovného zapnutia v prípade odpojenia. Bežný istič obsahuje dve spúšte – nadprúdovú (tepelná, bimetalová) a skratovú. Pri malých nadprúdoch zopína nadprúdová spúšť s určitým oneskorením. Pri väčších nadprúdoch zopína elektromagnetická spúšť, ktorá okamžite odpojí chránený obvod. [7]

1.4.3 Vysokonapäťové odpínače

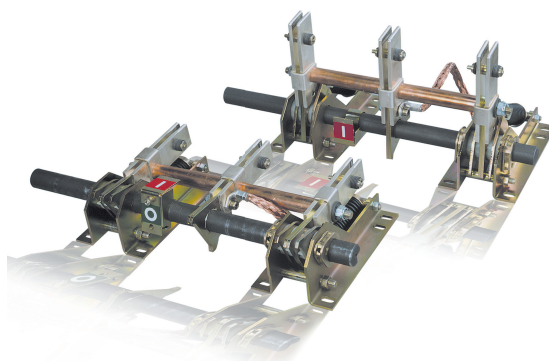
Vysokonapäťové motorizované odpínače slúžia na automatické odpojenie siete alebo časti obvodu bez zásahu osôb. Pokyn na odpojenie a opätovné zapojenie vydáva operátor alebo automatický systém. Elektrický motor následne natočí otočný mechanizmus tak aby bola dosiahnutá požadovaná poloha na vykonanie operácie. Snímací kontakt potom slúži na identifikáciu polohy spínača. [8]



Obr. 1.4: VN odpínač, prevzaté z [8].

1.4.4 Uzemňovače

Uzemňovač slúži na spojenie obvodu so zemou. V závislosti od pôdných podmienok a vyžadovanej impedancie proti zemi sa v rámci uzemňovacej sústavy inštaluje jeden alebo viac uzemňovačov. Účinnosť každého uzemňovača závisí predovšetkým od miestnych pôdných podmienok. Existujú pevné spojenia so zemou a uzemňovače, ktoré sa v prípade potreby automaticky pripoja na zem. Ovládanie týchto uzemňovačov zabezpečuje elektromotor, ich stav (vypnutá/zapnutá poloha) sa vyhodnocuje kontrolným kontaktom. [9]



Obr. 1.5: Uzemňovač EK6, prevzaté z [9].

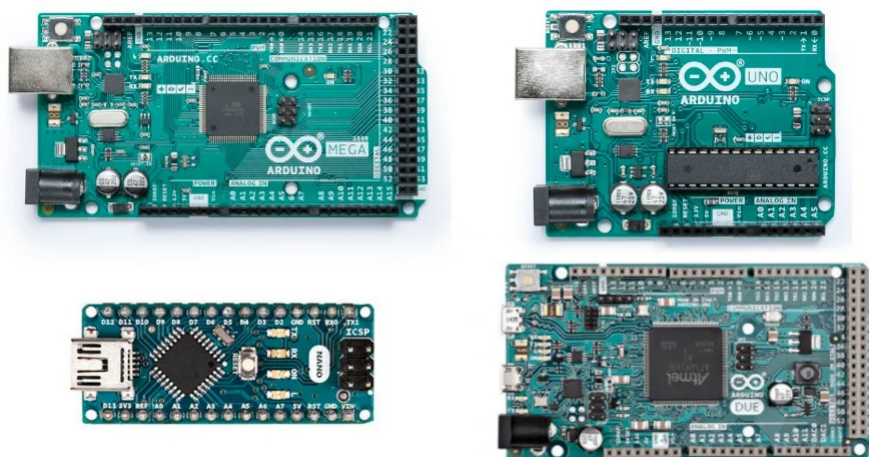
2 Hardware

V emulátore je použitých niekoľko zariadení slúžiacich na rôzne úkony. Spojením prvkov je dosiahnutá požadovaná funkcionálna. Použitý mikrokontrolér je Arduino Nano, používa sa na generovanie sínusového signálu a komunikáciu s terminálom. Použité sú operačné zosilňovače, digitálne potenciometre a sériovo-paralelné registre.

2.1 Arduino

Arduino je open-source platforma, využívajúca dosku s procesorom ATmega od spoločnosti Atmel, a vývojového grafického prostredia založeného na jazyku Processing. Táto platforma začala ako myšlienka sprístupniť možnosti programovania a vytvárania elektronických zariadení pre ľudí, ktorí sa špecializujú na design a umenie, bez predchádzajúcej skúsenosti s programovaním kontrolérov. Hlavnou myšlienkou bolo použiť vtedajšie technické možnosti na zjednodušenie používania mikrokontrolérov. Medzi základné požiadavky patrí návrh vývojového prostredia založené na jazyku Processing, vývojové prostredie funkčné na väčšine operačných systémov, jednoduchý programovací jazyk alebo framework pre mikrokontroléry, open-source software, open-source hardware a online sprievodca programovaním, dostupné návody a knižnice, a tiež dostupnosť kompatibilných modulov. [10]

V bakalárskej práci po zvážení všetkých hľadísk bola ako základ pre simulátor vybraná platforma Arduino, vzhľadom k dostupnosti kontroléru, materiálov a priaznivej cene.



Obr. 2.1: Verzie platformi Arduino, prevzaté z [11].

2.1.1 Arduino Nano

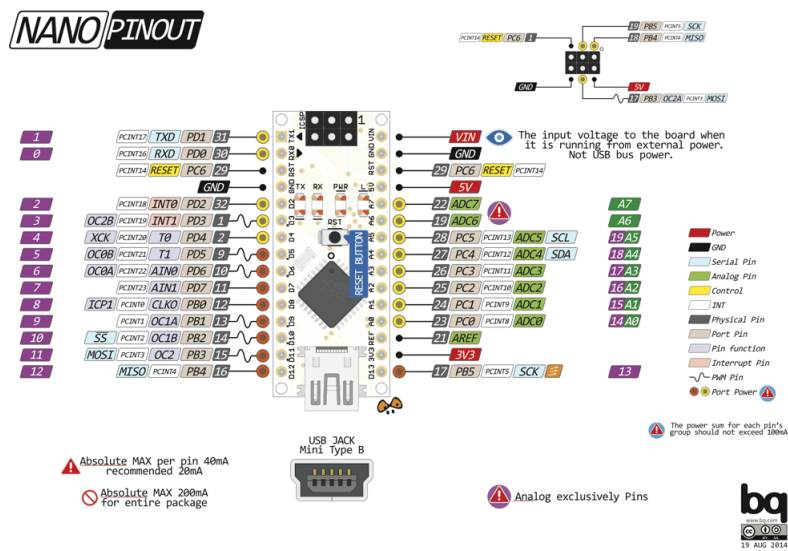
Základom simulátoru je mikrokontrolér Arduino vo verzii Nano. Z hľadiska funkcionality v počte a zložení výstupných pinov je veľmi podobné ako základná doska Arduino Uno, s jedným zásadným rozdielom; Arduino Nano sa dá jednoduchšie implementovať do dosky plošných spojov, jeho vývody viac pripomínajú puzdro klasického integrovaného obvodu. Vzhľadom na povahu vstupov kontrolných zariadení, ktoré sa budú používať na testovanie simulátora, je použitie Arduina Nano dostačujúce, pretože obsahuje digitálne piny a umožňuje komunikáciu s externými zariadeniami, ktoré ovplyvňujú výsledné správanie simulátora.

Všeobecné funkcie výstupov

- Digitálne vstupy a výstupy - umožňujú nastavenie vysokej alebo nízkej úrovne napätia, alebo odčítanie vysokej alebo nízkej úrovne. Nano disponuje dvanástimi digitálnymi pinmi s označením D2 až D13.
- Analógové vstupy - umožňujú analógovo-digitálny prevod vstupnej veličiny s rozlíšením 10 bitov. Najvyššia hodnota 1024 predstavuje napätie úrovne 5 V. Nano disponuje ôsmimi analógovými vstupmi s označením A0 až A7.
- Vstavaná LED - vstavaná LED dióda je prepojená s digitálnym pinom D13.
- 5V - výstupný pin slúžiaci na napájanie obvodov napätím 5 V. Cez napájací pin je možné Arduino napájať z externého zdroja.
- 3V3 - výstupný pin slúžiaci na napájanie obvodov, s napätím 3,3 V.
- VIN - externý napájací pin, maximálna veľkosť napájacieho napätia je 20 V.
- GND - záporná svorka napájania (zem).
- Reset - externý pin pre reset mikrokontroléra, aktívny v nízkej úrovni. [12]

Špeciálne funkcie výstupov

- Serial/UART – pin 0 (RX) a pin 1 (TX) slúžiace na komunikáciu po sériovej linke.
- SPI (Serial Peripheral Interface) – podpora zbernice SPI pomocou pinov D10 (SS), D11 (MOSI), D12 (MISO), D13 (SCK), taktiež podpora príslušnej knižnice SPI.
- I²C – podpora zbernice I²C pomocou pinov A4 (SDA) a A5 (SCL).
- PWM – digitálny výstup s podporou Pulse Width Modulation. V prípade Arduina Nano ide o piny s označeniami D3, D5, D6, D9, D10 a D11.
- REF – referenčná hodnota pre analógové vstupy. [12]



Obr. 2.2: Vstupy a výstupy Arduina Nano, prevzaté z [13].

2.1.2 Ďalšie možnosti využitia platformy Arduino

Okrem spomínaného Arduina Nano ponúka platforma Arduino aj iné vývojové dosky odlišujúce sa v prevedení dosky a v počte a funkcionalite vstupov a výstupov. Konkrétne ide o dosky Arduino Uno, Mega, Yún, Leonardo, Mini, Pro Mini a mnohé ďalšie. V ďalšom vývoji simulátoru je však zaujímavé Arduino Mega.

Arduino Mega

Arduino Mega obsahuje rovnaké typy pinov ako spomínané verzie, avšak hlavný rozdiel je v ich počte. Mega je možné použiť na spracovanie rozsiahlych projektov, pretože disponuje až päťdesiatimi digitálnymi pinmi, z nich až dvanásť podporuje moduláciu PWM. Medzi ďalšie rozdiely patrí šesťnásť analógových vstupov a oddelené vstupy podporujúce zbernicu SPI. Pre simuláciu väčšieho počtu zariadení sa Arduino Mega javí ako vhodná platforma.

2.2 Operačný zosilňovač

Pre dosiahnutie požadovanej amplitúdy signálu je nutné použiť zosilňujúce zariadenie. Najjednoduchšou voľbou je použitie operačného zosilňovača, z dôvodu jednoduchého nastavenia potrebných parametrov. Pre koncový zosilňovací stupeň bol vybraný operačný zosilňovač LM741. Pre zosilnenie bolo vybrané invertujúce zapojenie, ktorého napäťové zosilnenie A_U je definované ako pomer rezistorov R_2, R_1

realizujúcich spätnú väzbu, záporné znamienko znamená zmenu fázy o 180° :

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.1)$$

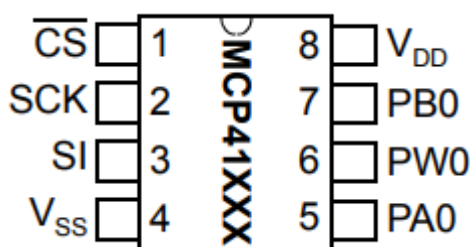
Výberom vhodných rezistorov sú docielené požadované zosilňujúce vlastnosti. Všetky podrobnosti sú uvedené zvlášť pri simulácii trojfázového napätia a prúdu. Kompenzácia vstupnej napäťovej nesymetrie sa vykonáva pomocou vonkajšieho potenciometra s hodnotou $10\text{ k}\Omega$, pripojeného na svorky vyrovnávania offsetu. Medzi nevýhody použitia operačného zosilňovača patrí nutnosť použitia symetrického napájacieho napätia. Operačný zosilňovač LM 741 je napájaný symetrickým napätím $\pm 15\text{ V}$. [14]

2.3 Digitálny potenciometer

Digitálny potenciometer sa využíva na elektronické nastavenie požadovaného odporu medzi výstupnými svorkami. Výhodou použitia digitálneho potenciometra je možnosť riadiť všetky operácie cez mikrokontrolér, bez nutnosti vonkajšieho manuálneho zásahu.

Pre komunikáciu mikrokontroléra sa používa zbernica SPI. Ide o sériové periférne rozhranie typu master-slave slúžiace na komunikáciu medzi mikroprocesormi a ostatnými integrovanými obvodmi pri použití spoločnej zbernice. Adresácia sa vykonáva pomocou špeciálnych vodičov, ktorých pripojenie na nízku úroveň aktivuje príjem alebo vysielanie zvoleného zariadenia. Vývojové prostredie Arduina disponuje možnosťou importu knižnice pre jednoduchšie použitie SPI zbernice.

Digitálny potenciometer bol vybraný z rady MCP41XXX/42XXX s 8-bitovou rozlišovacou schopnosťou od firmy Microchip. Rada obsahuje potenciometre s hodnotami 10 , 50 a $100\text{ k}\Omega$. [15]

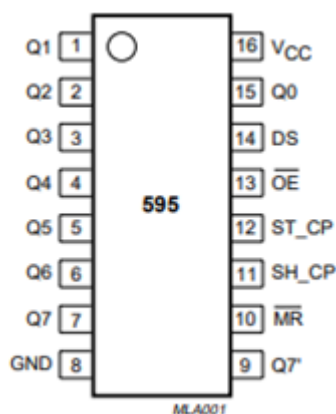


Obr. 2.3: Digitálny potenciometer, prevzaté z [15].

2.4 Sériovo-paralelný posuvný register

V simulačnej aplikácii je použitý sériovo-paralelný register 74HC595N. Pre komunikáciu s mikrokontrolérom sa používajú tri piny s označením SH_CP (shift register clock input), ST_CP (storage register clock input) a DS (serial data input). Pin SH_CP je používaný ako hodinový vstup, ktorý riadi presúvanie jednotlivých bitov v registri. V priebehu aktívnej hrany hodinového signálu prebieha aj kopírovanie výstupu z mikrokontroléra na dátový vstup. Pin ST_CP je povoľovací vstup pre sériový register, kedy jeho uvedením do nízkej úrovne je možný zápis do registra. Cez pin DS potom register kopíruje vstup od mikrokontroléra. [16]

Paralelné výstupy majú označenie Q0 až Q7. Pre sériové zapájanie viacerých registrov za sebou sa používa výstupný pin Q7'. Ak je zápis do registra dlhší ako 8 bitov, bity, ktoré pretečú, sa postupne objavujú na dátovom výstupe a stávajú sa dátovým vstupom pre ďalší zapojený register. Pri zapojení viacerých registrov je nutné paralelne prepojiť ich povoľovacie a hodinové vstupy, aby bolo možné zapisovať do všetkých registrov zároveň. [16]



Obr. 2.4: Posuvný register 74HC595N, prevzaté z [16].

3 Návrh emulátoru a jeho komponentov

Hardwarová časť emulátoru pozostáva z piatich komponentov, ktoré sú realizované na vlastnej doske plošných spojov. Ide o centrálnu jednotku, digitálne a binárne výstupy, dva zosilňovacie stupne pre simulované trojfázové napätie a prúd a napájací zdroj. Vnútorne sú jednotlivé dosky plošných spojov prepojené pomocou skrutkových konektorov a príslušných káblov. Táto koncepcia bola zvolená na základe jednoduchého testovania dosiek plošných spojov. Každý komponent zabezpečuje určitú funkciu, aby bol emulátor schopný simulovať prevádzku reálnej energetickej siete. Bloková schéma emulátoru sa nachádza na obrázku 3.1. Všetky blokové schémy použité v práci sú vytvorené pomocou online programu Creately¹.

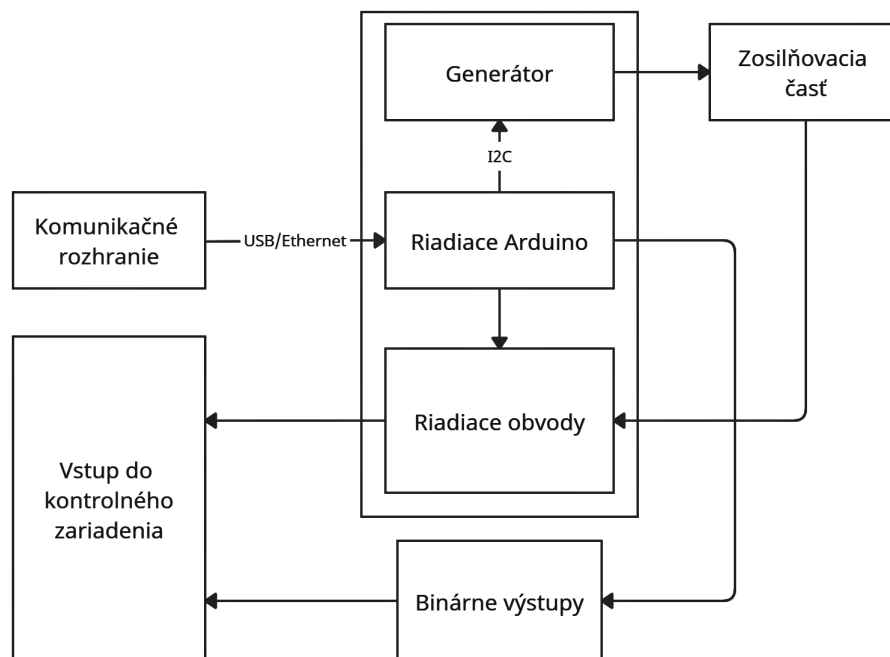
V centrálnej jednotke sa nachádza generátor PWM signálu. Presný postup generovania PWM signálu pre simulovanie jednotlivých fáz je popísaný v podkapitole 3.1. Ďalej sa tu nachádza riadiaci mikrokontrolér, ktorý prijíma všetky požiadavky od nastaveného komunikačného rozhrania a riadi výstupy emulátora. Prepínaním je možné pri štarte emulátoru nastaviť, aké rozhranie má byť inicializované, do emulátoru je implementovaný USB port a výstup ethernetového modulu. Komunikáciu je možné sprostredkovať pomocou USB portu alebo pripojením ethernetového modulu Arduina do lokálnej siete. Riadenie amplitúd výstupných veličín je realizované pomocou digitálnych potenciometrov. Výstupy simulujúce napätie a prúd jednotlivých fáz sú zakončené koncovkami RJ-45 a pripájajú sa pomocou príslušných káblov na zariadenie REF 615.

Zosilňovacie časti simulovaného prúdu a napätia sú realizované zvlášť pre každú veličinu. Tieto stupne obsahujú rekonštrukčné filtre a zosilňovače LM741. Podrobný popis zosilňovacieho stupňa napätia a nastavenie hodnoty výstupnej veličiny sa nachádza v podkapitole 3.2. Pre simulovaný prúd sa popis nachádza v podkapitole 3.3.

Časť simulujúca binárne výstupy má svoj vlastný modul obsahujúci štyri sériovo spojené registre typu 74HC595N. Komunikácia s týmto modulom je zabezpečená pomocou digitálnych výstupov Arduina, cez ktoré sa posielajú dáta do sériových registrov. Popis implementácie funkcie v mikrokontroléri na prenos dát do registrov sa nachádza v podkapitole 3.4.

Doska plošných spojov pre napájací zdroj bola vyrábaná ručne. Na dosku sa pripája externý transformátor 2x24 V. Realizácia napájacieho zdroju je popísaná v kapitole 3.6. Napájací zdroj zabezpečuje napájanie všetkých obvodov emulátoru. Riadiace obvody a modul binárnych výstupov je napájaný napätím +5 V, zosilňovacie stupne sú napájané symetrickým napätím ± 15 V.

¹Program je dostupný na webovej adrese <https://createlly.com/>.



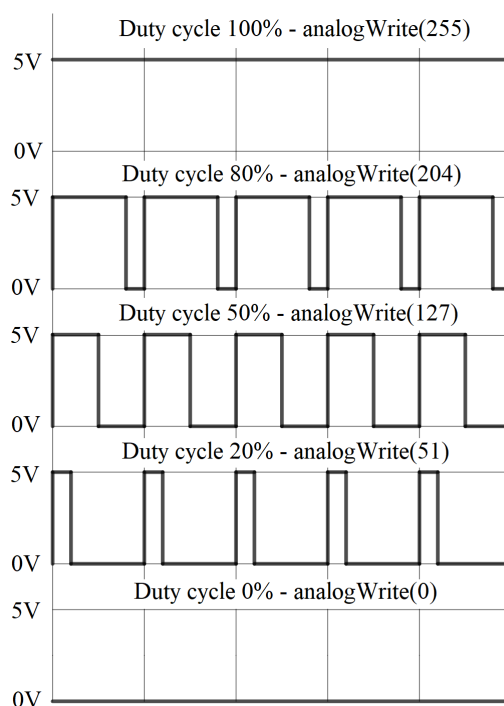
Obr. 3.1: Bloková schéma emulátora.

3.1 Generovanie sínusového signálu

Arduino je možné použiť na simulovanie sínusového signálu. Využíva sa na to pulzná modulácia PWM. Je potrebné správne modulovať signál na výstupe Arduina, aby emulátor vedel generovať sínusový signál. V tejto podkapitole sú popísané všetky mechanizmy k získaniu a regulovaniu sínusového signálu.

3.1.1 Pulse Width Modulation

PWM (Pulse Width Modulation) je pulzno-šírková modulácia, ktorá využíva rôznu triedu pri prenášaní informácie, elektrického napätia, prúdu alebo výkonu. Príklad PWM signálu pre rôznu triedu signálu (0%, 20%, 50%, 80%, 100%) generovaný pomocou príkazu *analogWrite()* Arduina sa nachádza na obrázku 3.2. Periodický signál môže nadobúdať len vysokú alebo nízku úroveň, pričom ich vzájomný pomer trvania v rámci jednej periódy (strieda) má v sebe zakódovanú informáciu. Tento spôsob modulácie je veľmi efektívny, pretože nevznikajú tepelné straty v dôsledku úbytku napätia na regulačnom prvku s odporovým charakterom. [17]



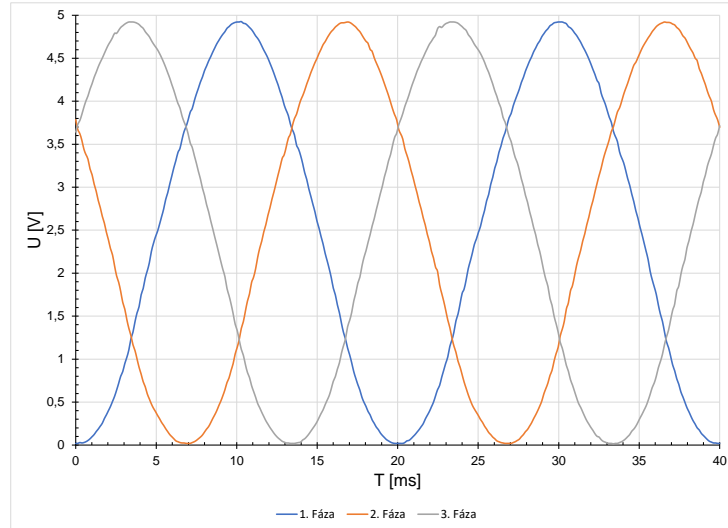
Obr. 3.2: Príklad PWM signálu.

3.1.2 Generovanie PWM signálu

Strieda PWM signálu sa mení podľa výpočtu hodnoty sínusového signálu v rámci jednej periódy. Parameter určujúci striedu v príkaze `analogWrite(pin, strieda)` je udávaný v rozsahu 0 až 255, hodnoty sú preto namapované v tomto rozsahu. Amplitúda signálu zodpovedá polovici daného rozsahu 127,5. Arduino neumožňuje generovanie záporných hodnôt napätia, z tohto dôvodu sú všetky hodnoty posunuté o polovicu rozsahu (o hodnotu 127,5) nahor.

Úprava frekvencie sa nastavuje pomocou dát prenesených od riadiaceho mikrokontroléra ukladaných do pomocnej premennej float, vynásobené premennou percentage, ktorá slúži na vyrovnanie zmien v oneskorení kódu.

Druhá a tretia fáza musia byť z charakteristiky trojfázového obvodu posunuté voči počiatočnej fázy o 120° , respektíve 240° . Operácia posunutia prebieha priamo v kóde pri výpočte stried jednotlivých PWM signálov pre konkrétne fázy. Priebeh výstupného signálu z generátoru po prechode rekonštrukčným filtrom sa nachádza na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Priebeh sínusového signálu generovaný mikrokontrolérom.

3.2 Trojfázové napätie

Ako referenčné zariadenie, ktorého výstupy sa budú simulovať je použitý kombinovaný senzor na vnútorné použitie s označením KEVCD 24_. Podľa priloženej dokumentácie [4] je možné na vstup zariadenia priviesť združené napätie 22 kV. Transformačný pomer senzoru je 10 000:1. Pre európske siete je uvažovaná frekvencia 50 Hz. Simulovaná hodnota jednej fázy napätia bude po výpočte 12,7 kV. Tiež je braná do úvahy možnosť kolísania amplitúdy. Na výstupe zariadenia je na základe parametrov senzoru potrebné získať sínusový signál s amplitúdou 1,8 V. Absolútne hodnoty kolísania amplitúdy signálu nie sú až tak dôležité pre simuláciu, ide o napodobenie prepätia a podpätia v danej sieti, overuje sa reakcia zabezpečovacieho systému.

PWM signál po prechode rekonštrukčným filtrom má tvar sínusového signálu v rozsahu 0 až 5 voltov. Pre trojfázový signál je použitá trojica PWM digitálnych výstupov Arduina. Ich vzájomné posunutie voči sebe o 120° sa prevádza priamo v zdrojovom kóde na základe výpočtu. Jednotlivé výstupy u_1, u_2, u_3 sa po prechode rekonštrukčným filtrom dajú vyjadriť ako:

$$u_1 = 2,5(\sin(\omega t)) + 2,5 \quad [\text{V}], \quad (3.1)$$

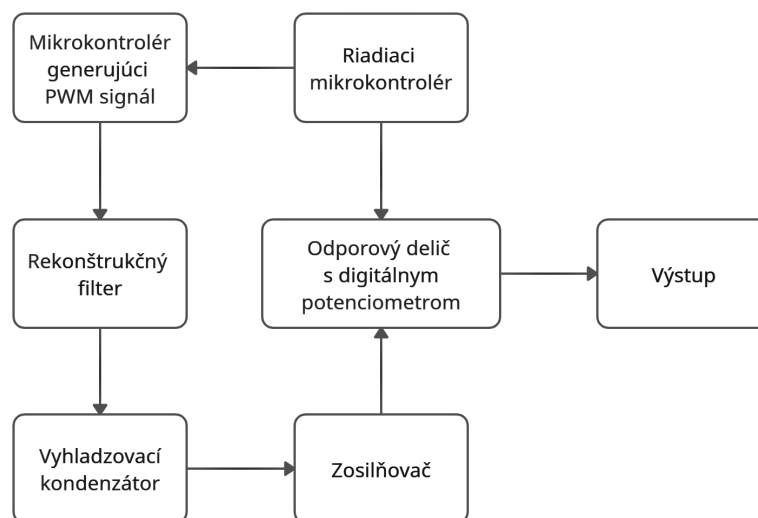
$$u_2 = 2,5(\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\pi) + 2,5 \quad [\text{V}], \quad (3.2)$$

$$u_3 = 2,5(\sin(\omega t) + \frac{2}{3}\pi) + 2,5 \quad [\text{V}]. \quad (3.3)$$

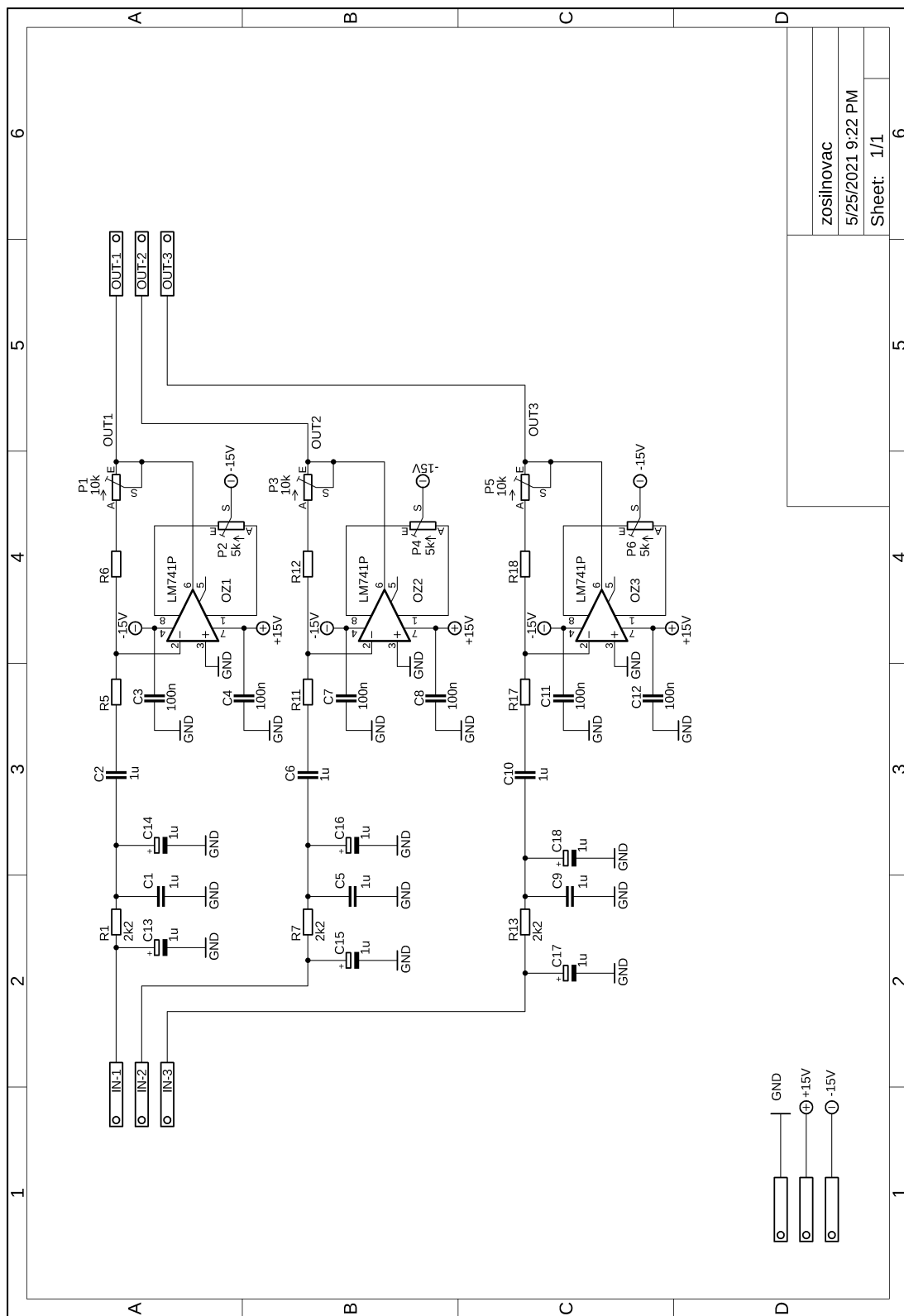
Pre správnu funkciu kontrolného zariadenia je nutné aby signál neobsahoval jednosmernú zložku, jeho amplitúda bola nastaviteľná a mala správnu hodnotu zodpovedajúcu reálnej situácii, preto sa so signálom ďalej pracuje aby bolo možné dosiahnuť všetky potrebné vlastnosti. Výstup generátora je napojený na modul realizujúci rekonštrukciu signálu pomocou filtra typu dolnej priepuste a jeho finálne zosilnenie pred vstupom do riadiacej časti.

Rekonštrukčný filter je tvorený kondenzátorom s hodnotou 100 nF a rezistorom s hodnotou 2,2 k Ω . Pre stabilizáciu napätia je paralelne na vstup aj výstup rekonštrukčného filtra pripojený elektrolytický kondenzátor. Dolná priepusť spolu s vyhladzovacími kondenzátormi tvoria rekonštrukčný filter na získanie hladkého sínusového signálu. V ďalšom kroku je nutné odfiltrovať jednosmernú zložku signálu pred jeho samotným zosilnením pomocou operačného zosilňovača. Na filtráciu je medzi operačný zosilňovač a výstup deliča pripojený kondenzátor s hodnotou 1 μ F.

Poslednú časť modulu emulátora na rekonštrukciu a zosilnenie signálu tvorí zosilňovací stupeň, tvorený operačným zosilňovačom s označením LM741 v invertujúcom zapojení. Hodnoty odporov pre zosilnenie sú 20 k Ω a 30 k Ω . Pre prípadné korekcie s ohľadom na vonkajšie vplyvy a toleranciu rezistorov pre zosilnenie je do spätnej väzby zosilňovača zapojený potenciometrický trimer s hodnotou 10 k Ω . Bloková schéma obvodu simulujúceho jednu fázu napätia je zobrazená na obrázku 3.4. Schéma je rovnaká pre zosilňovacie stupne pre odvody simulujúce napätia a prúd sa nachádza na obrázku 3.5. Hodnoty všetkých odporov sú vypočítané a doladené na základe výsledkov simulácií a požadovaných vlastností zosilňovacieho stupňa.



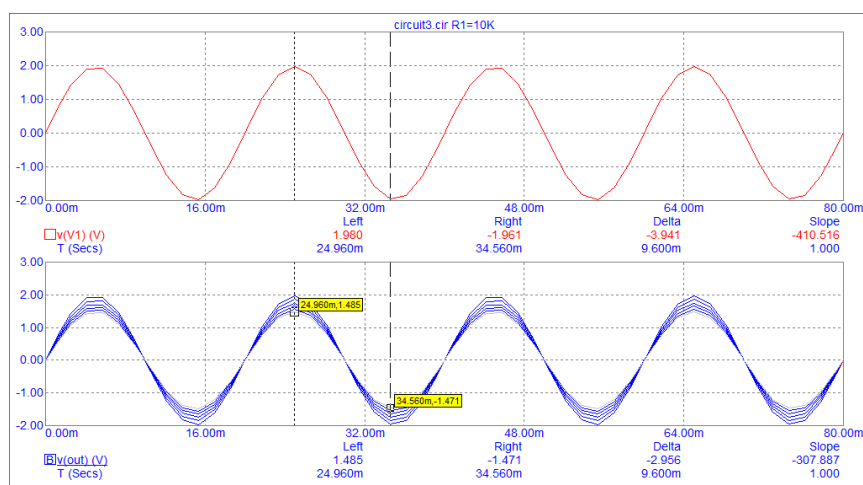
Obr. 3.4: Bloková schéma obvodu simulujúceho jednu fázu napätia.



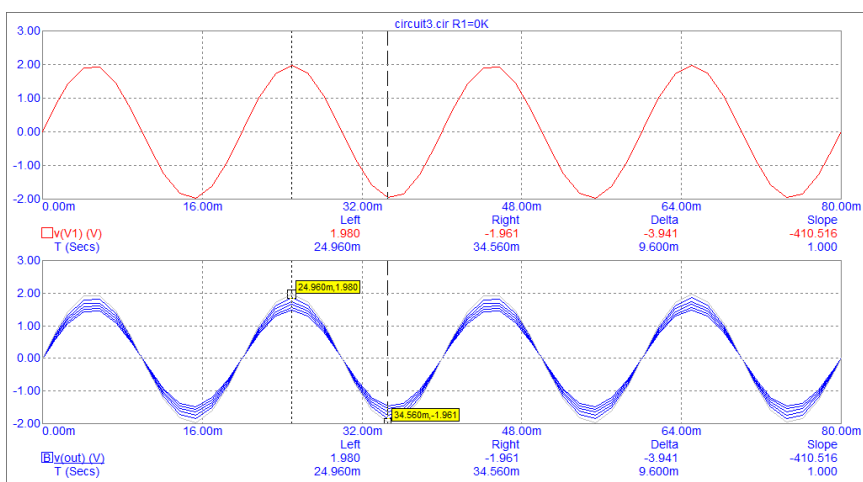
Obr. 3.5: Schéma zapojenia modulu zosilňovacieho stupňa.

3.2.1 Nastavenie veľkosti simulovaného napätia

Nastavenie veľkosti simulovaného napätia je realizované pomocou odporového deliča napätia a nastavuje sa v riadiacom module. Na obrázkoch 3.6 a 3.7 sú znázornené odhady simulácie v programe MicroCap-12, ktoré boli použité ako základ pre zapojenie. Delič je realizovaný digitálnym potenciometrom s maximálnou hodnotou 10 k Ω a rezistorom s hodnotou 30 k Ω . Konfigurácia odporového deliča umožňuje nastaviť hodnotu simulovaného napätia v rozpätí 11,5 kV až 15,0 kV. V priebehu testov delič vykazoval značnú nelineárnosť rozsahu, tento jav bol potlačený úpravou mapovania hodnôt pri nastavovaní výstupnej hodnoty v riadiacej jednotke.



Obr. 3.6: Simulácia výstupnej hodnoty napätia - spodná hranica.



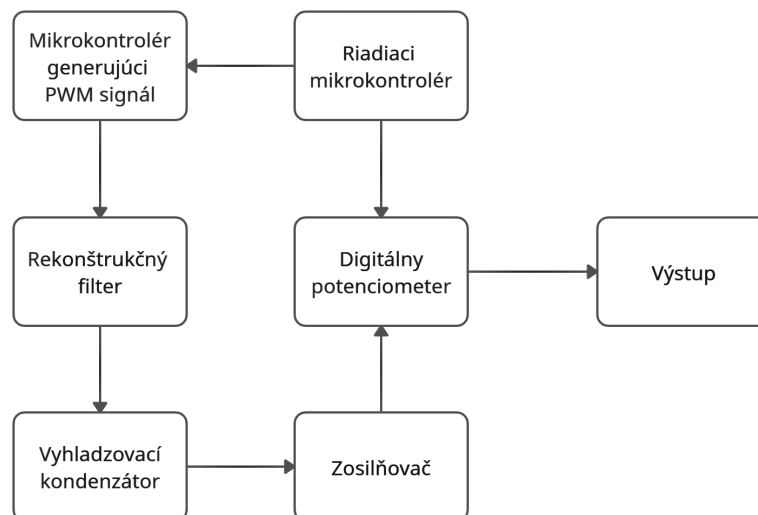
Obr. 3.7: Simulácia výstupnej hodnoty napätia - horná hranica.

3.3 Trojfázový prúd

Zariadenie KEVCD umožňuje snímanie trojfázového prúdu. Prúd sa pomocou cievky v zariadení transformuje na napätie s transformačným pomerom, ktorý je určený parametrami cievky. Podľa priloženej dokumentácie sa prúd transformuje na napätie v pomere 80 A/150 mV. Pre jednoduchšiu predstavu sa prúd s hodnotou 1 A transformuje na napätie s hodnotou 1,875 mV.

Referenčná hodnota pre základ nastavenia simulácie bola použitá hodnota nepretržitého tepelného prúdu, podľa priloženej dokumentácie je jeho hodnota 1 250 A. Celý rozsah bude predstavovať simulovaný prúd 2 300 A efektívnej hodnoty. Amplitúda tohto prúdu je 3 253,7 A, po transformovaní sa získava signál napätia s amplitúdou 6,01 V.

Generovanie sínusového signálu je obdobné ako v prípade simulovania trojfázového napätia. Na trojici PWM výstupov Arduina je generovaný PWM signál posunutý na druhej fázy o 120° a na tretej fázy o 240° , odpojenie fázy je opäť realizované softwarovo a signál je privedený do samostatného modulu pre jeho rekonštrukciu a finálne zosilnenie. Po prechode rekonštrukčným filtrom typu dolnej priepuste, vyhladení elektrolytickými kondenzátormi a odfiltrovaní jednosmernej zložky je jeho amplitúda zosilnená pomocou operačného zosilňovača v invertujúcom zapojení. Hodnoty odporov pre zosilnenie sú 12 k Ω a 75 k Ω . Pre prípadné korekcie s ohľadom na vonkajšie vplyvy a toleranciu rezistorov pre zosilnenie je do spätnej väzby zosilňovača zapojený potenciometrický trimer s hodnotou 10 k Ω .



Obr. 3.8: Bloková schéma obvodu simulujúceho jednu fázu prúdu.

3.3.1 Nastavenie veľkosti simulovaného prúdu

Nastavenie hodnoty simulovaného prúdu sa bude prevádzať po konečnom zosilnení pomocou digitálneho potenciometra z rady MCP41XXX/42XXX od firmy Microchip. V prípade trojfázového prúdu je nutné nastavovať jeho simulovanú hodnotu od 0 A až do maximálnej možnej hodnoty (alebo hodnoty, ktorá je považovaná za skrat). Jednoduchým spôsobom na vyriešenie daného problému je použitie digitálneho potenciometra s maximálnym odporom 100 k Ω . S jeho pomocou je možné napätie nastavovať v lineárnom rozsahu od maximálnej definovanej hodnoty na nulu.

3.4 Simulácia digitálnych binárnych výstupov

Binárne hodnoty predstavujú univerzálnu formu pre simulovanie veľkého množstva senzorov a spínačov. Všetky snímače pracujúce ako spínače, ktoré udržujú jednu stabilnú hodnotu úrovne signálu (nízku 0 V, alebo vysokú 5 V) sa dajú jednoducho nahradiť pomocou odvodu, ktorý sa elektronicky ovláda pre tieto dva stavy. Vytvorený simulátor teda pokryje široké spektrum senzorov. Na emulátor bola vybraná platforma Arduino, ďalej sa bude pracovať s možnosťami tejto platformy. Arduino disponuje digitálnymi výstupmi, avšak počet týchto výstupov je limitovaný v rámci jedného zariadenia a je značne neefektívne používať viacero kontrolérov pre tento účel a riešiť komunikáciu medzi nimi. Arduino disponuje funkciou *shiftOut()* pre bitový posun v hardwarových posuvných registroch, vyžaduje však pripojenie externého integrovaného odvodu na niektorý digitálny výstup. Táto možnosť sa bude využívať pri simulovaní veľkého množstva binárnych digitálnych hodnôt. Pre tento účel je nutné použiť sériovo-paralelný register. Veľkou výhodou použitia registrov je ich možnosť radenia sériovo za sebou. Nie je teda problém efektívne simulovať veľké množstvo rôznych senzorov. V simulačnej aplikácii je použitý sériovo-paralelný register 74HC595N. Schéma zapojenia modulu, ktorý realizuje simuláciu digitálnych binárnych výstupov sa nachádza na obrázku 3.11.

3.4.1 Implementácia funkcie *shiftOut()*

Vývojové prostredie Arduina umožňuje nastavenie výstupom sériovo-paralelného registra pomocou implementácie funkcie s názvom *shiftOut()*. Vstupné parametre funkcie s ukážkou jej implementácie sú uvedené vo výpise 3.1. Na naplnenie štyroch registrov spojených sériovo za sebou sa použije štvornásobná implementácia funkcie *shiftOut()*. Podkapitola 3.4.1 je spracovaná na základe podkladov [10].

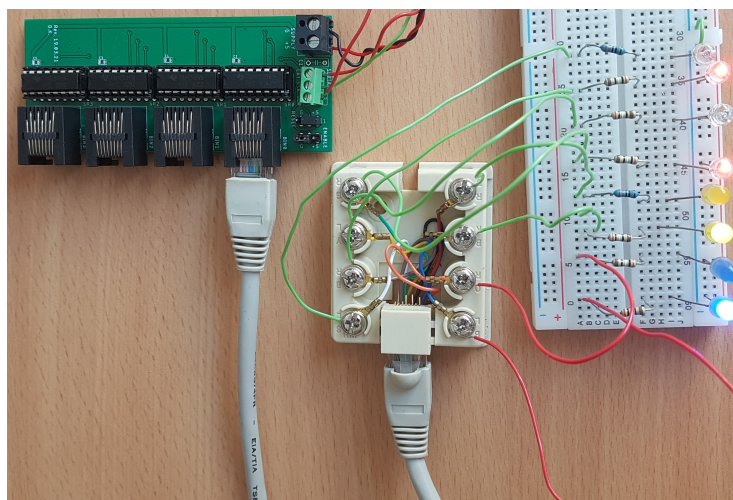
Výpis 3.1: Implementácia funkcie *shiftOut()*.

```
//Implementácia funkcie pre bitový posun registrov  
shiftOut(dataPin, clockPin, bitOrder, data);
```

- dataPin – pin posiela signál do posuvného registra, ten následne kopíruje dáta zo shift registra do storage registra na základe prijatého signálu.
- clockPin – pin, kde Arduino posiela hodinový signál, pre posuvný register, týmto signálom sa hodnoty v registri posúvajú o jedno miesto.
- bitOrder – poradie bitov, MSBFIRST (Most Significant Bit) alebo LSBFIRST (Least Significant Bit).
- data – vstupné dáta, parameter funguje pre vstupný byte, alebo pre číselnú premennú.

3.4.2 Test modulu pre nastavenie binárnych výstupov

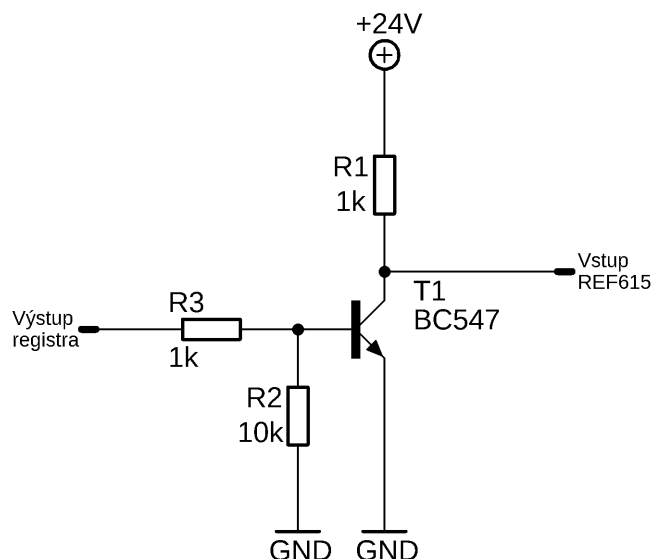
Jednoduchý test funkčnosti modulu pre nastavovanie digitálnych výstupov sa prevádza pomocou pripojenia LED diód na výstupy jedného sériovo-paralelného registra. Modul je pripojený do ovládacej jednotky a ovládaný pomocou ovládacieho mikrokontroléru. LED diódy slúžia ako jednoduchý indikátor stavu vysokej alebo nízkej hodnoty. Na obrázku 3.9 je vidieť pripojenie LED diód na prvý výstupný register, je vidieť aj konkrétna sekvencia nastavená pomocou terminálového rozhrania. Výstupy pre každý register sú riešené pomocou konektorov RJ-45, pre pripojenie LED diód je použitý prípravok, ktorý je rovnako vidieť na obrázku.



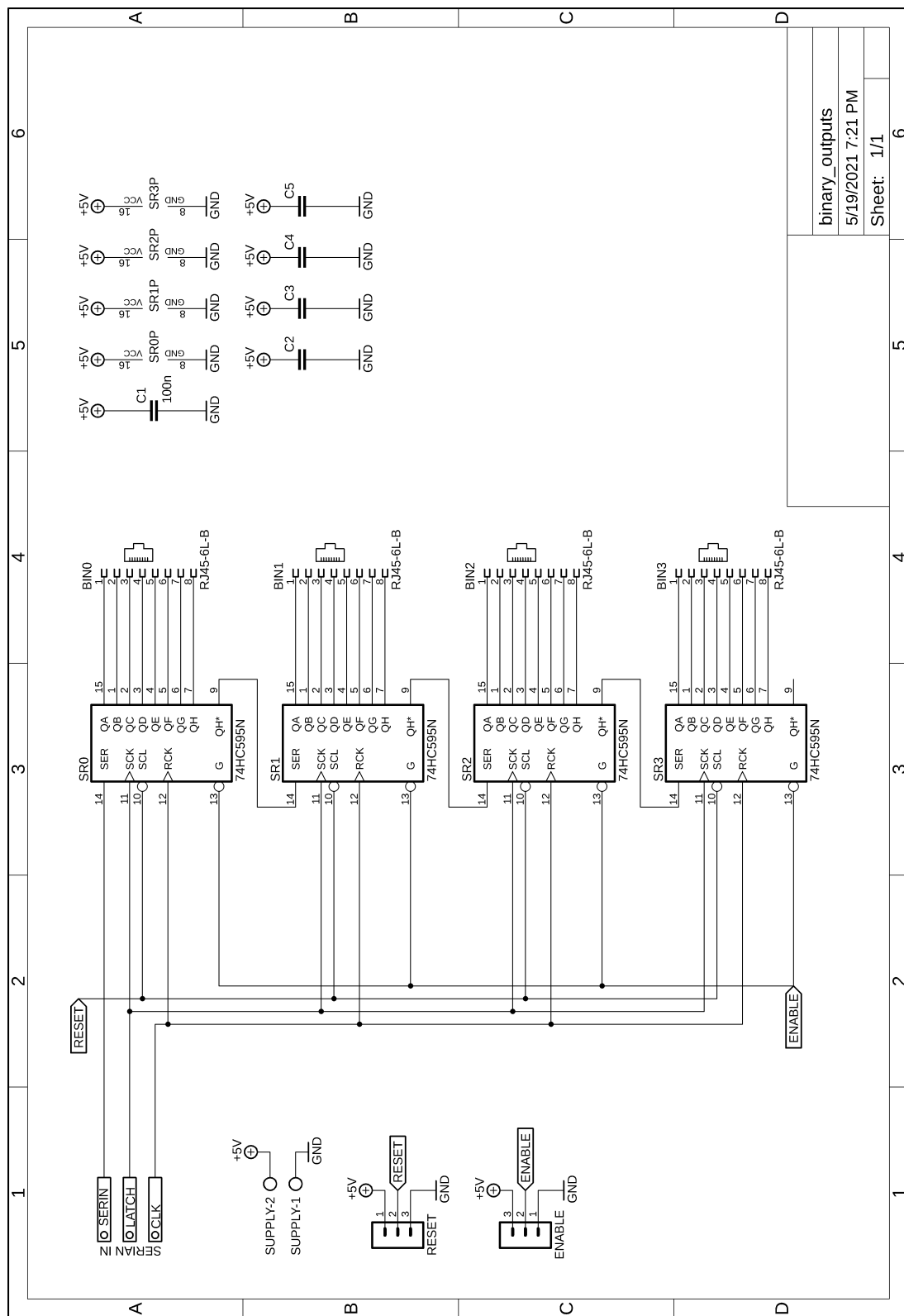
Obr. 3.9: Test modulu binárnych výstupov.

Testovanie binárnych výstupov bolo realizované pomocou zariadenia REF615. Pri testovaní funkcie binárnych výstupov bolo zistené, že použitý sériovo-paralelný register nie je schopný napájať potrebný počet binárnych vstupov zariadenia REF615, preto bol v kombinácii s ním použitý tranzistorový spínač na napätie 24 V. Táto korekcia výstupného modulu bola následne kompenzovaná pomocou funkcií vo webovom rozhraní, z pohľadu obsluhujúceho používateľa sa navonok táto zmena neprejavila. Ako spínací tranzistor bol použitý tranzistor BC547 v zapojení zobrazenom na obrázku 3.10. Schéma ukazuje pripojenie jedného výstupu registra na jeden vstup kontrolného zariadenia REF615.

Schéma obvodu realizujúceho binárne výstupy na nachádza na obrázku 3.11. Doska plošných spojov realizovaná na základe tejto schémy má výstup priamo z paralelných registrov. Na základe nutnosti použitia tranzistorového spínača bol spínač zhotovený externe na kontaktnom poli.



Obr. 3.10: Schéma tranzistorového spínača.



Obr. 3.11: Schéma zapojenia modulu binárných výstupov.

3.5 Návrh ovládacej jednotky

Centrálny modul emulátoru tvorí jeho základný panel, ktorý realizuje komunikáciu emulátoru s komunikačnými rozhraniami, generovanie trojfázového signálu, riadenie pripájania a odpájania jednotlivých fáz, nastavovanie výstupných hodnôt simulovaných signálov a nastavovanie výstupných hodnôt digitálnych binárnych výstupov. Zapojenie je realizované na jednej doske plošných spojov, kde je umiestnený mikrokontrolér generujúci PWM signál, riadiaci mikrokontrolér, vstupný USB port, vstupný ethernetový port, prepínač, ktorým sa volí komunikačné rozhranie, digitálne potenciometre a rezistory slúžiace na nastavenie hodnôt výstupných veličín a výstupné konektory RJ-45, ktoré prepájajú jednotlivé fázy emulátoru s kontrolným zariadením REF615. Modul je prepojený so zosilňovacími stupňami a modulom realizujúcim binárne výstupy pomocou skrutkovým konektorov. Prívod napájania je tiež realizovaný pomocou skrutkového konektoru. Schéma ovládacej jednotky, ktorá je rozdelená na dva listy sa nachádza na obrázku 3.13 a na obrázku 3.14.

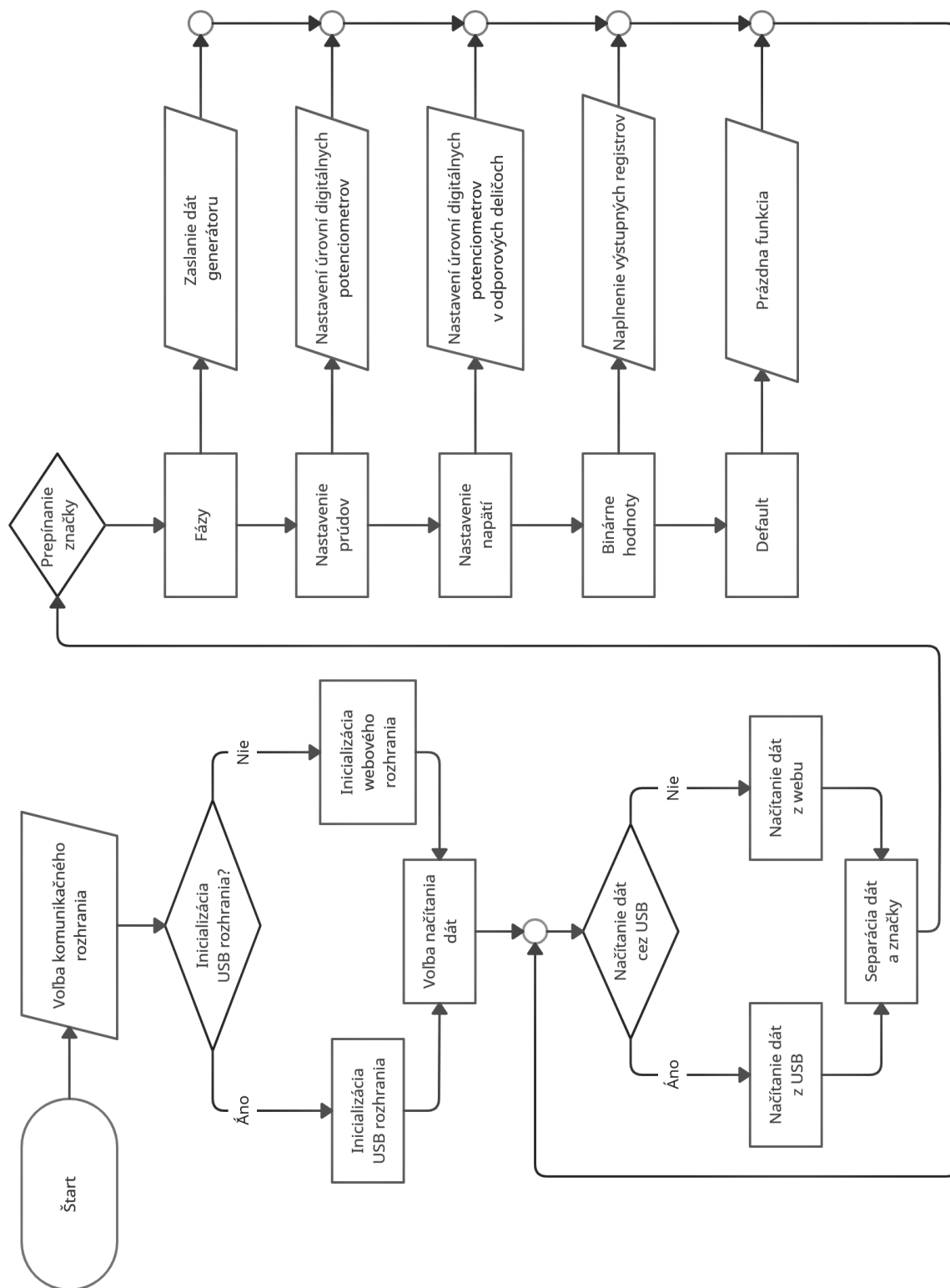
3.5.1 Zdrojový kód ovládacej jednotky

Zjednodušená bloková schéma zdrojového kódu ovládacej jednotky je zobrazená na obrázku 3.12. Vo vývojovom prostredí Arduina sú do kódu implementované knižnice na podporu požadovaných funkcionalít. Zdrojový kód obsahuje všetky funkcie potrebné pre komunikáciu s ovládacím rozhraním (terminálové a webové ovládacie rozhranie). Na komunikáciu s generátorom je implementovaná funkcia na podporu zbernice I²C, generátor na základe príkazu ovládacej jednotky nastavuje frekvenciu signálu a vypínanie fáz. Nastavenie digitálnych potenciometrov prebieha pomocou funkcie zabezpečujúcej komunikáciu cez zbernicu SPI.

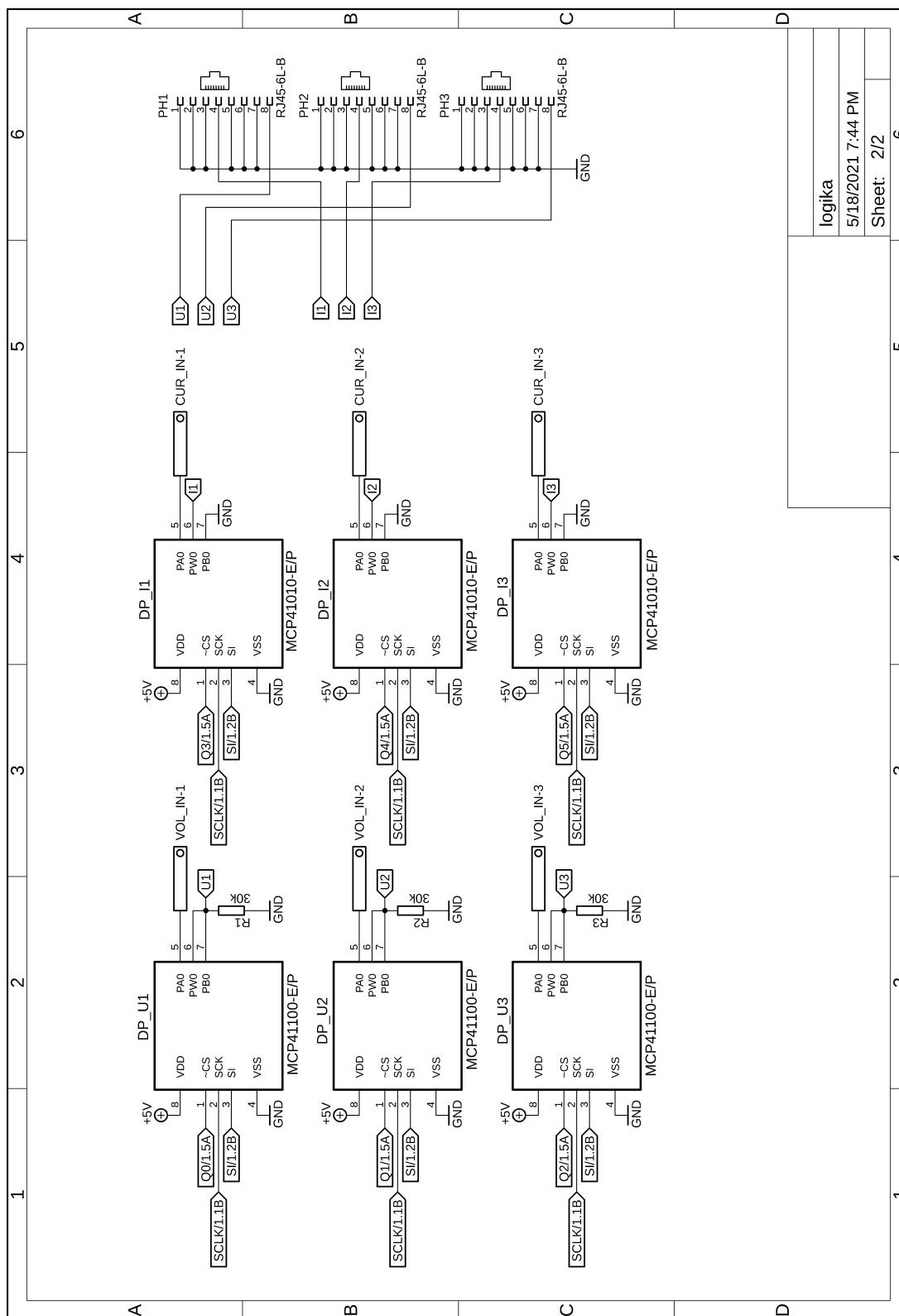
Použité knižnice

- *UIPEthernet.h*² - zabezpečenie komunikácie ethernetového modulu s lokálnou sieťou.
- *Wire.h* - zabezpečenie komunikácie pomocou zbernice I²C s generátorom.
- *SPI.h* - zabezpečenie komunikácie pomocou zbernice SPI s digitálnymi potenciometrami.

²Knižnica je dostupná na webovej stránke <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/uipethernet/>.



Obr. 3.12: Bloková schéma zdrojového kódu.

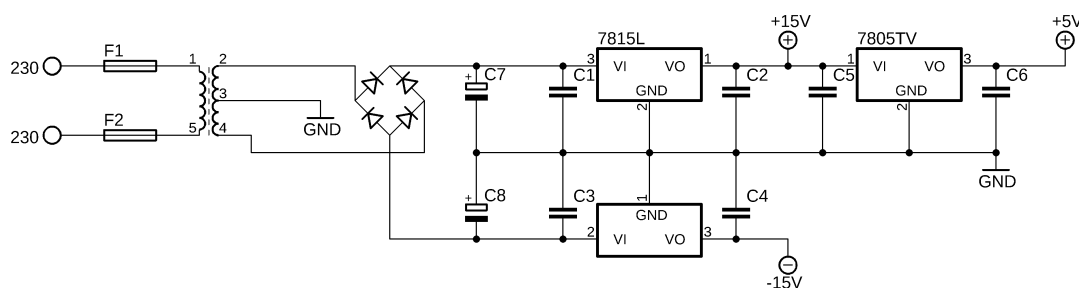


Obr. 3.14: Schéma zapojenia ovládacej jednotky - druhý list.

3.6 Napájací zdroj

Napájací zdroj je riešený ako univerzálny napájací zdroj, ktorý poskytuje všetky potrebné úrovne napätí na napájanie všetkých prvkov emulátoru. Samotný mikrokontrolér je napájaný napätím 5 V, rovnako posuvné registre a digitálne potenciometre potrebujú napájanie 5 V. Výnimku tvorí univerzálny zosilňovač, ktorý musí byť napájaný symetrickým napätím ± 15 V. Schéma napájacieho zdroja je zobrazená na obrázku 3.15.

Celý emulátor bude napájaný zo siete 230 V. Vstupné napätie je najprv transformované pomocou toroidného transformátora označenia INDEL TST 60/012. Výstup transformátora tvoria štyri svorky, na každom páre je na výstupe napätie 24 V. Prostredné svorky sú spojené a vytvoria nulovú hladinu jednosmerného napätia. Napätie je následne usmernené pomocou diódového mostíka, vyhladené pomocou elektrolytických kondenzátorov $4700\mu\text{F}/35\text{ V}$. Vplyvom nedokonalého vyhladenia by bolo možné pozorovať jemné zvlnenie napätia v časovom priebehu. Na finálnu stabilizáciu napätia sú použité napäťové stabilizátory LM7815CT pre kladné napätie +15 V a LM7915CT pre záporné napätie -15 V. Výstupný prúd stabilizátorov je 1,5 A. Pre odvody napájané +5 V je nutné vytvoriť ďalší napájací okruh pomocou napäťového stabilizátora LM7805. Stabilizátor je priamo zapojený medzi 15 V úroveň a zem. Kvôli rušeniu, ktoré vzniká na prívodoch stabilizátorov, sa blízko prívodov pripájajú blokovacie kondenzátory s hodnotou 100 nF/ 50 V.



Obr. 3.15: Schéma napájacieho zdroja.

4 Komunikačné rozhrania

Emulátor je možné pripojiť k počítaču pomocou USB portu a ovládať ho pomocou grafického užívateľského rozhrania, alebo ho pripojiť do lokálnej internetovej siete pomocou interného ethernetového modulu a ovládať ho pomocou webového rozhrania. Voľba rozhrania prebieha pomocou prepínača. Pri štarte systému sa vyhodnotí poloha prepínača a inicializuje príslušné komunikačné rozhranie. Emulátor potom po celú dobu prijíma informácie cez zvolené rozhranie.

4.1 Komunikačný reťazec

Mikrokontrolér Arduino disponuje len obmedzenými možnosťami pamäti pre zdrojový kód, preto je nutné ovládací program písať úsporne. Jednou z možností je použiť rovnaký komunikačný reťazec pre obidva typy rozhrania, ktoré sa budú spracovávať rovnako, mikrokontrolér na základe pokynu inicializuje sériové alebo internetové rozhranie. Komunikačný reťazec, pozostáva z dvoch častí. Prvá časť obsahuje značku medzi dvoma špeciálnymi znakmi. Značka slúži na identifikáciu príkazu, špeciálne znaky slúžia na jej odlíšenie v rámci komunikačného reťazca. Mikrokontrolér spracováva dáta z niekoľkých oblastí; binárne hodnoty vstupov, veľkosti napätí na jednotlivých fázach, veľkosti prúdov na jednotlivých fázach, veľkosť požadovanej frekvencie a zapojenie (prípadne odpojenie) jednotlivých fáz. Vo výpise 4.1 sa nachádza príklad zaslania dátového reťazca na USB rozhranie pre nastavenie výstupov registrov.

V prípade binárnych hodnôt sa jednotlivo spracúvajú dáta pre každý register. Zápis do registra je možný cez celé číslo, reprezentujúce binárnu hodnotu. Celkovo sa aktualizujú štyri čísla pre každý register, následne sú spojené do jedného dátového Stringu. Čísla pre jednotlivé registre sú oddelené čiarkami.

Nastavenie prúdu a napätia prebieha spôsobom aktualizácie hodnôt posuvníkov pri ich každej zmene, ich hodnoty sa znovu skladajú do Stringu, tri hodnoty pre každú veličinu. K takto spracovaným hodnotám sa pridáva príslušná značka reprezentujúca napätie alebo prúd.

Tlačidlá pre vypínanie fáz sa aktualizujú spoločne s frekvenciou. Frekvencia sa posiela v rovnakom dátovom reťazci, pretože dáta odpojenia fáz a požadovaná frekvencia sa posielajú pomocou zbernice do generátoru PWM signálu a vyhodnotia sa. V kontroléri prebieha separácia značky a dát pomocou špeciálnych znakov, dáta sa ďalej rozdeľujú na jednotlivé hodnoty pomocou separačných čiarok. Na základe týchto príkazov a informácií sa nastavujú príslušné hodnoty na konkrétnom výstupe simulátora.

Výpis 4.1: Príklad dátového reťazca.

```
// Príklad dátového reťazca: qbined10,14,8,27,;.
    serialWrite("qbined" + data + ";.");
// Zaslanie reťazca na USB port
```

Význam znakov

- q – začiatok značky,
- bin – značka (v tomto prípade určujúca nastavenie binárnych výstupov),
- e – koniec značky,
- d – začiatok dát,
- data – dáta prenášané vo formáte hodnota1, hodnota2, hodnota3, (hodnota4),
- ; – koniec dát,
- . – koniec načítania správy.

Značky používané na komunikáciu

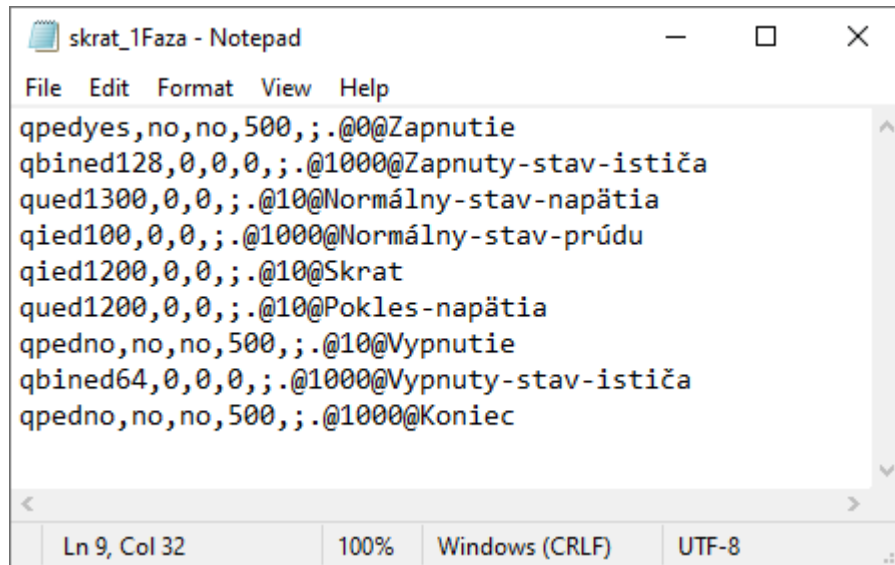
- bin – nastavenie binárnych hodnôt,
- i – nastavenie hodnôt prúdov,
- u – nastavenie hodnôt napätí,
- p – zapínanie (odpájanie) fáz a nastavenie frekvencie.

4.2 Simulácia scenárov

Pri simulácií určitej zložitej situácie, ktorá môže nastať v sieti je nutné nastaviť veľké množstvo parametrov v relatívne krátkom čase. Zadávanie parametrov manuálne je náročné a je takmer nemožné zachovať nastavenú časovú postupnosť jednotlivých operácií. Z tohto dôvodu je nutné zabezpečiť automatické zadávanie a posielanie parametrov do emulátoru. Komunikačné rozhranie disponuje funkciou načítanie hodnôt z textového súboru. Príkazy musia mať vopred určenú formu, aby ich program mohol spracovať.

Ukážka scenáru pre simulovanie skratu na prvej fáze je na obrázku 4.1. Jeden riadok súboru predstavuje jeden príkaz pre emulátor. Príkaz sa skladá z troch častí; v prvej časti je reťazec znakom a číselných hodnôt, ktorý je identický z komunikačným reťazcom, ktorý sa bude používať v terminálovom aj webovom rozhraní. Druhou časťou je číselná hodnota, ktorá slúži na pozastavenie programu po odoslaní príkazu. Tretia časť nie je povinná a obsahuje krátky komentár, aby mohol používateľ sledovať aký príkaz bol práve odoslaný. Komentár nie je veľmi praktický pri veľmi krátkej čakacej dobe programu, pretože v malom okne, kde sa zobrazuje,

pravdepodobne nebude postrehnuteľný, avšak funkcionálna pri dlhšej čakacej dobe je dostatočná.



```
skrat_1Faza - Notepad
File Edit Format View Help
qpedyes,no,no,500,;. @0@Zapnutie
qbined128,0,0,0,;. @1000@Zapnuty-stav-ističa
qued1300,0,0,;. @10@Normálny-stav-napätia
qied100,0,0,;. @1000@Normálny-stav-prúdu
qied1200,0,0,;. @10@Skrat
qued1200,0,0,;. @10@Pokles-napätia
qpedno,no,no,500,;. @10@Vypnutie
qbined64,0,0,0,;. @1000@Vypnuty-stav-ističa
qpedno,no,no,500,;. @1000@Koniec
Ln 9, Col 32 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Obr. 4.1: Ukážka scenáru.

4.3 Terminálové rozhranie

Ovládanie simulátora je zabezpečené pomocou USB portu prepojeného s Arduino. Samotný terminál je naprogramovaný pomocou jazyka JAVA vo vývojovom prostredí Eclipse. Terminál je grafické užívateľské rozhranie s ovládacími prvkami na ovládanie jednotlivých funkcií.

Ukážka grafického prostredia terminálu je vyobrazená na obrázku 4.2. Prvou funkciou je ovládanie jednotlivých hodnôt binárnych výstupov. Pole ovládacích tlačidlových prvkov sa jednoducho prepína z nízkej do vysokej úrovne a naopak, aktuálnu hodnotu stavu na konkrétnom výstupe reprezentuje farba tlačidla (vysoká úroveň – zelená farba (ON), nízka úroveň – červená farba (OFF)). Pravá časť, slúžiaca na ovládanie trojfázového napätia pozostáva z troch posuvníkov, každý pre jednu fázu. Rozsah stupnice sa vzťahuje na menovité simulované napätie 12,7 kV, medze stupnice umožňujú nastaviť krajné hodnoty simulovaného napätia. Prostredná časť rovnako pozostáva z troch posuvníkov, slúži však na nastavovanie veľkosti simulovaného prúdu. Ich stupnica umožňuje nastavenie prúdu od 0 až do 2300 A. Ľavá časť slúži na nastavenie frekvencie trojfázového signálu. Možnosť nastavovania frekvencie sa môže využiť pri simulovaní poklesu frekvencie. Rovnako sa v tejto časti nachádzajú tlačidlá na odpojenie danej fázy napätia. Na výber príslušného scenára,

ktorý sa má simulovať slúži modré tlačítka v spodnej časti terminálu. Po jeho stlačení sa načíta okno, v ktorom je možné vybrať príslušný scenár vo forme textového dokumentu. Po potvrdení výberu sa spustí príslušný scenár a tlačítka zmení svoju farbu na červenú, až kým sa simulovaný scenár neukončí.



Obr. 4.2: Ovládací terminál.

4.4 Webové rozhranie

Webové rozhranie bolo designované a programované vo vývojovom prostredí IntelliJ IDEA. Pri návrhu rozhrania bol použitý framework Spring¹. Ide o open-source aplikačný rámec pre vývoj J2EE aplikácií. V kombinácii s frameworkom Spring bol používaný Engine Thymeleaf², ktorý pracuje na strane serveru a má na starosti šablonovanie. Obsah šablón je možné dynamicky meniť. Šablóna pre rozmiestnenie jednotlivých ovládacích prvkov bola vygenerovaná pomocou online generátoru HTML šablón³. Funkcie webového rozhrania sú skoro totožné ako v prípade terminálového

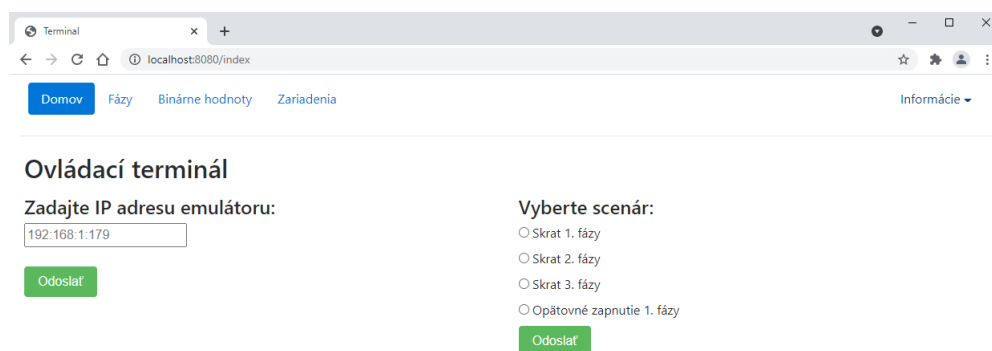
¹Oficiálne stránky frameworku <https://spring.io/>.

²Oficiálne stránky Engine Thymeleaf <https://www.thymeleaf.org/>.

³Generátor je dostupný na webovej adrese <https://www.layoutit.com/>.

rozhrania, navyše sú pridané simulácie konkrétnych stavov zariadení s ich popisom. Jednotlivé nastavenia sa spracovávajú pomocou dát z formulárov na webovej stránke, funkcie ich skladajú do komunikačného reťazca a odosielať cez lokálnu sieť do emulátoru. Počítač ovládajúci emulátor musí byť pripojený do lokálnej siete. Rozhranie s hlavnými ovládacími prvkami je rozdelené do štyroch kariet. Na každej karte sú logicky poskladané príslušné prvky, ktoré sa môžu nastavovať v rámci jedného formuláru.

Na domovskej karte je možné nastaviť IP adresu emulátoru, základná IP adresa je 192.168.1.179, je aj priamo zapísaná v zdrojovom kóde ovládacej jednotky a na správnu funkciu odosielania dát adresu nie je nutné zadávať znovu. Nachádza sa tu aj možnosť zvolenia jednotlivých scenárov, ako príklad sú uvedené niektoré z testovaných scenárov spolu s ukážkou domovskej karty na obrázku 4.3. Spracovanie scenárov je rovnaké ako v prípade terminálového rozhrania a bolo popísané v kapitole 4.2.



Obr. 4.3: Ukážka domovskej karty webového rozhrania.

Nastavenie veľkostí simulovaného napätia, prúdu, frekvencie výstupného signálu spolu so zapojením a odpojením fáz sa samostatne dá nastaviť na karte s názvom Fázy, ktorej ukážka s príkladom nastavených hodnôt sa nachádza na obrázku 4.4. Karta obsahuje formulár s posuvníkmi na nastavenie potrebných simulovaných parametrov. Rozsah jednotlivých stupníc zodpovedá medzným simulovaným hodnotám. Hodnoty nastavené používateľom sú následne spracované webovou aplikáciou a odoslané do emulátoru.

Pre testovacie a nastavovacie účely je nutné ovládať binárne výstupy emulátoru samostatne. Na tento účel slúži karta s názvom Binárne hodnoty, ktorej ukážka sa nachádza na obrázku 4.5. Karta obsahuje formulár s tridsiatimi dvomi zaškrťovacími políčkami, ktoré sú zafarbené podľa stavu v akej polohe sa má daný binárny výstup emulátoru nachádzať. Formulár si pamätá posledné nastavenie výstupu.

Zapojenie fáz

1. fáza ☒ 2. fáza ☒ 3. fáza ☒

Frekvencia

Hodnota: 50.01 Hz

Napätie

1. fáza 2. fáza 3. fáza

Hodnota: 13 kV Hodnota: 11.5 kV Hodnota: 14.5 kV

Prúd

1. fáza 2. fáza 3. fáza

Hodnota: 0 A Hodnota: 2300 A Hodnota: 222 A

Obr. 4.4: Ovládanie stavov fáz.

Terminal x +

localhost:8080/binary-values

Domov Fázy **Binárne hodnoty** Zariadenia Informácie

Binárne hodnoty

0	1	2	3	4	5	6	7
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	9	10	11	12	13	14	15
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	17	18	19	20	21	22	23
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
24	25	26	27	28	29	30	31
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Obr. 4.5: Ovládanie binárnych hodnôt.

Najdôležitejšou úlohou pri práci s emulátorom je možnosť nastavovania kritických stavov siete spolu s polohami všetkých simulovaných zariadení. Na ovládanie slúži karta s názvom Zariadenia, jej ukážka sa nachádza na obrázku 4.6. Karta je rozdelená na dva formuláre, prvým sa nastavujú kritické stavy, ktoré môžu vzniknúť pri bežnej prevádzke. Konkrétne je možné nastaviť skraty jednotlivých fáz, odpojenie jednotlivých fáz, vysoké zaťaženie siete a celé nastavenie je možné vrátiť do stavu normálnej prevádzky. Druhá časť nastavuje požadované polohy simulovaných zariadení. Polohy zariadení sa samostatne nastavujú pomocou príslušných tlačidiel. Aktiváciu príslušného tlačidla sprevádza požadovaná reakcia zmeny stavu siete.

Terminal

localhost:8080/devices

Domov Fázy Binárne hodnoty **Zariadenia** Informácie

Stavy

Skrat			Odpojenie			Vysoké zaťaženie	Normálna prevádzka
1. fáza	2. fáza	3. fáza	1. fáza	2. fáza	3. fáza		
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Odoslať

Štandardná konfigurácia G

Odpojonač		Podvozok ističa		Istič		Uzemňovač	
Zapnutie obvodu	Pripojenie záťaže	Prevádzka	Test	Vypnutá poloha	Zapnutá poloha	Vypnutá poloha	Zapnutá poloha
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Odoslať

Obr. 4.6: Ovládanie zariadení pomocou webového rozhrania.

5 Výsledky simulácií

Overenie funkčnosti emulátoru sa prevádza pomocou kontrolného zariadenia REF 615 od firmy ABB. Hodnoty napätí a prúdov jednotlivých fáz sa zobrazujú na displeji zariadenia, spolu s ďalšími hodnotami ako celkový výkon, činný výkon atď. So zariadením je možné komunikovať cez počítač ethernetovým rozhraním, program PCM600 potom zabezpečuje komunikáciu (viz kapitola 1.3.2). Záznamy o zmene stavu siete je možné zobrazovať pomocou programu Wavewin ABB (viz kapitola 1.3.3).

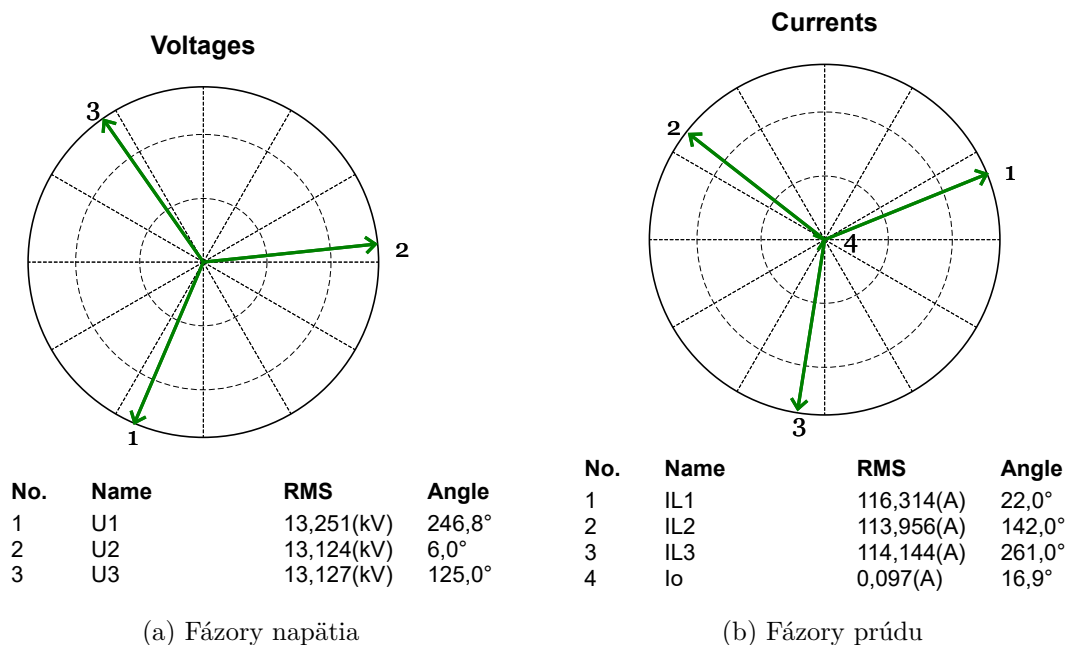
Testuje sa samotná funkčnosť jednotlivých zariadení. Pri napäťovom a prúdovom senzore sa skúma nastavenie veľkosti požadovaných veličín a odozva kontrolného zariadenia. Funkcia spínača je simulovaná ako zapnutie jednotlivých fáz trojfázového signálu. Jednotlivé binárne vstupy reprezentujúce jednotlivé zariadenia sú testované pre prevádzkové polohy vychádzajúce zo štandardnej konfigurácie G zapojenia kontrolného zariadenia REF615. Overuje sa taktiež nastavenie polôh zariadení pomocou webového rozhrania.

Poslednou časťou testov emulátoru je skombinovanie jeho celej funkcionality tak, aby sa jeho správanie blížilo prevádzke reálnej trojfázovej siete. Na tento účel slúžia scenáre vytvorené na simulovanie prevádzky a kritických stavov siete. Scenáre sa načítavajú z textových súborov, alebo niektoré sú priamo implementované vo webovom ovládacom rozhraní a spúšťajú sa príslušnými tlačidlami.

5.1 Simulácia prúdového a napäťového transformátoru

Po uvedení emulátoru do stavu prevádzky siete sa na displeji zariadenia objavia merané hodnoty. Rovnako zariadenie vytvorí záznam o spustení prevádzky, z ktorého je mimo grafických priebehov napätia a prúdu možné vytvoriť aj stručné hlásenie. Jeho obsahom sú aj fázorové diagramy, ktoré zachytávajú počiatočné stavy napätí a prúdov v čase vytvorenia hlásenia. Fázorové diagramy napätia a prúdu zachytáva obrázok 5.1. Z diagramu fázorov napätia (a) je zrejmé posunutie fáz voči sebe o 120° , čím je simulované trojfázové napätie. Rovnako sa dá odčítať aj veľkosť simulovaného napätia.

Na diagrame fázorov prúdov (b) je vidieť rovnako posunutie jednotlivých fázorov voči sebe. Diagram znázorňuje rovnaké zaťaženie jednotlivých fáz. Nulový vodič nie je súčasťou emulátoru, jeho hodnota je spôsobená rušením v okolí vstupu pre senzor na jeho meranie. Fázorový diagram napätia je prevzatý z hlásenia o zapnutí fáz, diagram prúdu je prevzatý z hlásenia o aktuálnej hodnote prúdov.



Obr. 5.1: Diagram znázorňujúci fázory.

5.1.1 Normálna prevádzka

Základným stavom siete, z ktorého sa bude vychádzať pri ďalšom simulovaní kritických stavov siete, je normálna prevádzka energetickej siete. V ideálnom prípade je zaťaženie siete rovnomerne rozdelené do všetkých fáz. V prípade simulovania tohto stavu bola veľkosť simulovaného prúdu nastavená na relatívne nízku hodnotu a jednotlivé fázy sú zaťažené rovnomerne. Na obrázku 5.2 je vyobrazený displej zariadenia REF 615 a vidieť na ňom simuláciu rovnomerného zaťaženia fáz. Na simulovanie bežnej prevádzky je možné využiť aj simulačný scenár, kde bude zohľadnená náhodnosť okamžitého zaťaženia fáz. Hodnoty napätia a frekvencie pri normálnej prevádzke odpovedajú popisu v kapitole 1.1.

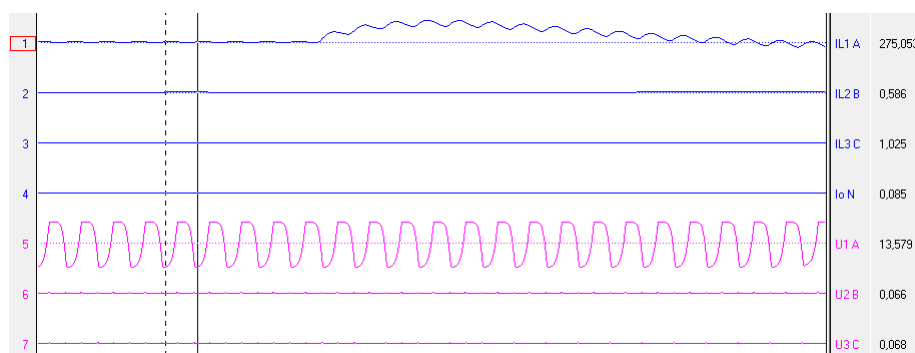
REF615		IA
IL1-A	115.5	
IL2-A	113.2	
IL3-A	113.5	
Io-A	0.0	
U12-kV	22.172	
U23-kV	22.085	
U31-kV	22.499	

Obr. 5.2: Normálna prevádzka siete.

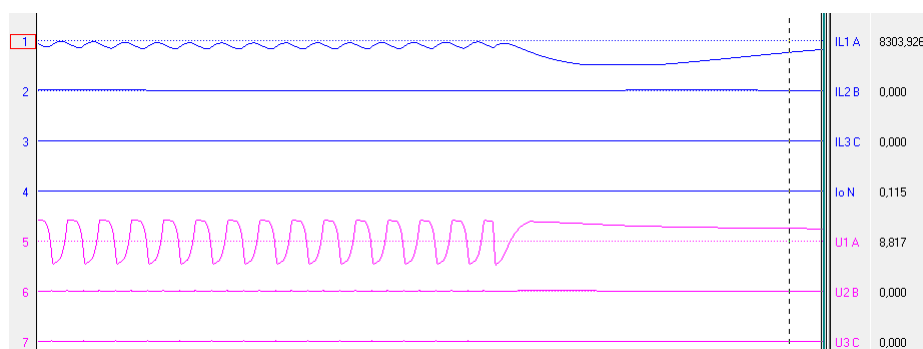
5.1.2 Skrat fázy

Pri simulovaní skratu sa vychádza z faktu, že v sieti sa nachádza istič dimenzovaný na určitý menovitý prúd a ak dôjde k skratu tento istič sa vypne a odpojí poruchovú časť siete. V prípade emulátoru je možné kritický stav aktivovať pomocou funkcie vo webovom rozhraní. Emulátor dostane pokyn, aby určitú dobu držal stav normálneho zaťaženia siete, následne po uplynutí tejto doby je vyvolaný skrat skokovým zvýšením prúdu v obvode a po krátkej dobe je fáza emulátorom odpojená, došlo k vypnutiu ističa. Zariadenie REF615 túto udalosť zaznamená. Následne uvedené priebehy sa dajú rozdeliť na dve udalosti. Záznamy sú potom zobrazené v programe Wavewin ABB, kde je vidieť reálny priebeh simulovaného prúdu a napätia. Demonštračne sa simuluje len priebeh na prvej fáze, ostatné fázy sú odpojené.

V prvom prípade je zaznamenaný skokový nárast prúdu ako je zrejmé z obrázku 5.3. Následkom prechodného javu v obvode dochádza najprv k rozkolísaniu prúdu, následne je jeho stav ustálený do doby, než dôjde k odpojeniu pomocou ističa. V druhom prípade je vidieť na zázname úplné odpojenie prvej fázy od obvodu, tento jav je vidieť na obrázku 5.4.



Obr. 5.3: Skrat prvej fázy.

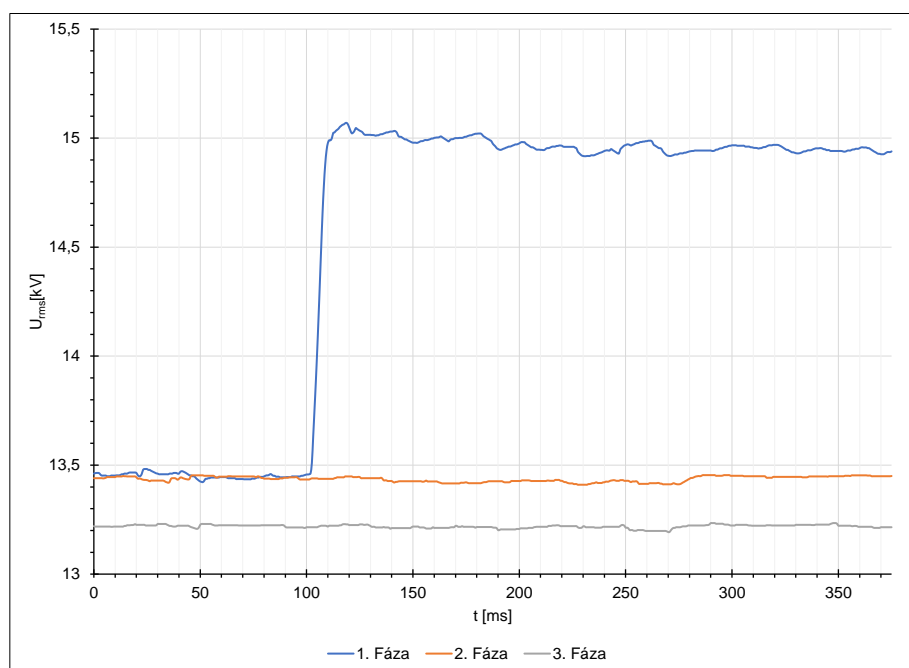


Obr. 5.4: Odpojenie prvej fázy.

5.1.3 Podpätie a prepätie

V reálnych podmienkach prevádzky je niekedy možné pozorovať podpätie alebo prepätie na určitých fázach napätia. Pre simulovanie tohto stavu je emulátoru zaslaný príkaz, aby skokovo nastavil hodnotu simulovaného napätia. Rovnako je možné zmenu vykonať pozvoľne, výsledok by však nebol v tomto prípade taký očividný. V demonštračnom prípade sú všetky fázy držané v ustálenom stave v miernom prepätí, následne prvá fáza spadne na minimálnu možnú hodnotu, ktorú dovoľuje nastaviť emulátor.

Na obrázku 5.5 je zachytený priebeh efektívnych hodnôt napätia všetkých fáz po dobu 375 ms. Je zrejмый nárast napätia prvej fázy napätia na hodnotu 15 kV. Graf je vytvorený v programe Microsoft Excel s exportovaných hodnôt záznamu zariadenia REF 615.



Obr. 5.5: Prepätie prvej fázy.

5.1.4 Pokles a nárast frekvencie

V emulátore je možné nastaviť rozpätie frekvencie pre trojfázový signál od 45 Hz do 55 Hz. Táto zmena sa nastavuje softwarovo pri výpočte generovania PWM signálu

v generátore. V prípade simulovania poklesu alebo zvýšenia frekvencie, je možné navodiť daný stav s sieťou. Pre testovanie tejto funkcionality je generovaný signál na prvej fáze napätia s frekvenciou odpovedajúcou krajným hodnotám rozsahu stupnice. Na obrázku 5.6 je simuláciu signálu s frekvenciou 45 Hz (a), 55 Hz (b) a požadovaná frekvencia simulovaného signálu v normálnych podmienkach 50 Hz (c), konkrétne ide o parameter označený f-Hz.

REF615		REF615		REF615	
IL1-A	98.0	IL1-A	85.8	IL1-A	93.1
IL2-A	0.0	IL2-A	0.0	IL2-A	0.0
IL3-A	0.0	IL3-A	0.0	IL3-A	0.0
Io-A	0.0	Io-A	0.0	Io-A	0.0
U12-kV	12.043	U12-kV	12.351	U12-kV	12.423
U23-kV	0.000	U23-kV	0.000	U23-kV	0.000
U31-kV	12.047	U31-kV	12.355	U31-kV	12.423
f-Hz	45.00	f-Hz	55.00	f-Hz	50.00
S-kVA	1176.3	S-kVA	1072.3	S-kVA	1156.5

(a) 45 Hz
(b) 55 Hz
(c) 50 Hz

Obr. 5.6: Polohy nastavenia frekvencie.

5.2 Simulácia zariadení

Pri simulovaní jednotlivých zariadení pripojených na kontrolné zariadenie REF 615 sa vychádza zo štandardnej konfigurácie G (viz. kapitola 1.3.1). Všetky zariadenia sú pripojené na príslušné binárne vstupy svorky X110. V tabuľke 5.1 je popísané zapojenie binárnych výstupov emulátoru na konkrétne vstupy konektoru X110 kontrolného zariadenia REF 615. V priebehu testov bolo nutné medzi emulátor a kontrolné zariadenie zapojiť ešte tranzistorový spínač riadený emulátorom, aby bolo možné binárne vstupy správne ovládať. Vonkajšia funkcionality emulátoru nebola touto zmenou ovplyvnená. Nastavovanie zariadení je možné realizovať pomocou terminálového rozhrania, je však nutné všetky binárne výstupy emulátoru nastavovať manuálne. Vo webovom rozhraní je ovládací panel, kde sa nastavuje požadovaná poloha zariadenia. Pri použití tejto možnosti sa všetky výstupy nastavujú automaticky podľa príkazu používateľa.

Tab. 5.1: Pripojenie binárnych vstupov REF 615 na emulátor.

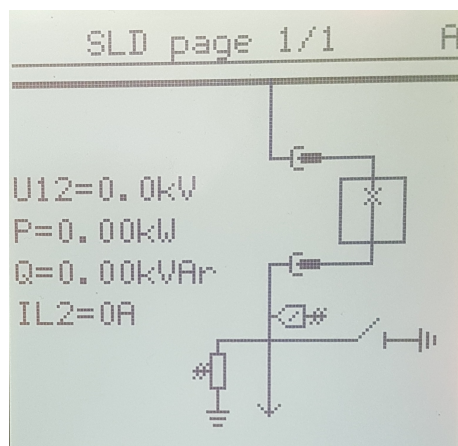
Špička konektoru X110	Pripojenie na emulátor
1	Binárny výstup 0
2	GND
3	Binárny výstup 1
4	GND
5	Binárny výstup 2
6	Binárny výstup 3
7	GND
8	Binárny výstup 4
9	Binárny výstup 5
10	GND
11	Binárny výstup 6
12	Binárny výstup 7
13	GND

5.2.1 Odpojovač

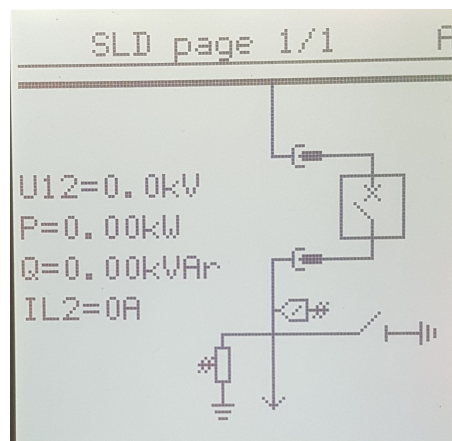
Jediným zariadením, ktoré nie je simulované pomocou binárnych výstupov emulátoru je odpojovač. Na jeho simuláciu slúžia príkazy z ovládacieho rozhrania, ktoré spracováva generátor PWM signálu a odpája jednotlivé fázy napätia. Ak riadiaca jednotka dostane príkaz na odpojenie niektorej fázy napätia, zašle príkaz cez zbernicu I²C do generátoru PWM signálu, ktorý ju spracuje a požadovaný PWM výstup už nenastavuje úroveň modelovaného sínusového signálu. V počiatočnom nastavení generátor negeneruje žiadny PWM signál, sieť je odpojená.

5.2.2 Istič

Stav polohy ističa je definovaný pomocou binárneho vstupu na zariadení REF 615 (špičky č. 6 a 7) slúžiaceho na indikáciu natiahnutia pružiny v kombinácii so špičkou č.5 konektoru X110. Špička č.5 má pri teste trvalo pripojenú vysokú úroveň napätia, špička č.7 je trvalo pripojená na zem. Ak je na špičku č.6 privedená vysoká úroveň napätia, zariadenie indikuje stav ističa ako zapnutý (a), ak je na špičku privedená nízka úroveň zariadenie indikuje vypnutú polohu (b). V zariadení sú tieto stavy indikované pomocou schémy na obrázku 5.7.



(a) Zapnutá poloha

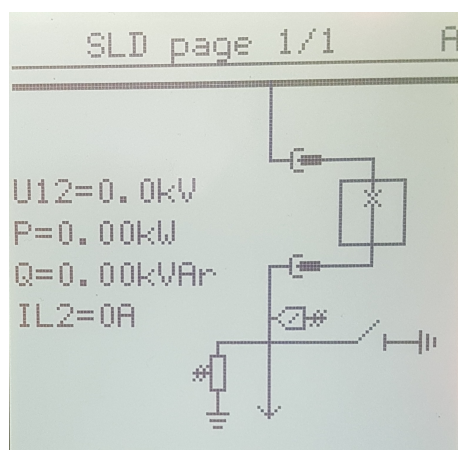


(b) Vypnutá poloha

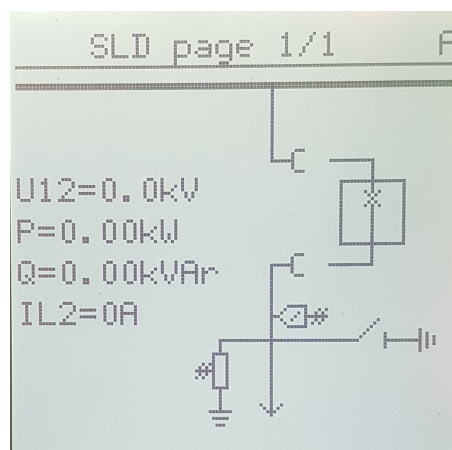
Obr. 5.7: Indikácia polôh ističa.

5.2.3 Podvozok ističa

Ďalšie zariadenie obsiahnuté v konfigurácii G je podvozok ističa. Na indikáciu stavu sa používa trojica špičiek č. 8, 9, 10. Servisná pozícia podvozku je indikovaná pomocou privedenie vysokej úrovne napätia na špičku č. 8 na ostatné špičky je privedená nízka úroveň. Testovacia poloha je indikovaná pomocou privedenia vysokej úrovne napätia na špičky č. 8 a 9, špička č. 10 je trvalo pripojená na zem. Zobrazenie stavov v kontrolnom zariadení pre servisnú (a) a testovaciu polohu (b) je zobrazené na obrázku 5.8.



(a) Prevádzková poloha

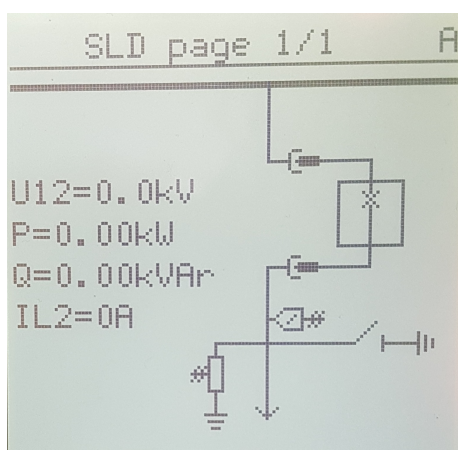


(b) Servisná poloha

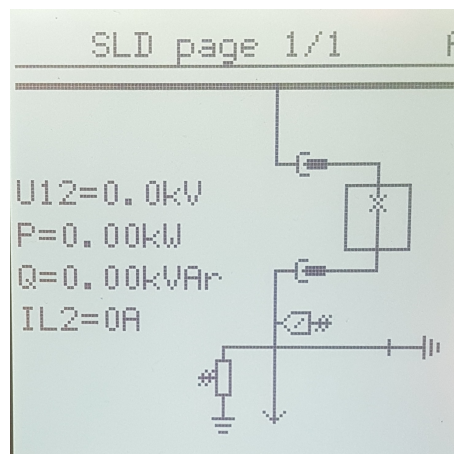
Obr. 5.8: Indikácia polôh podvozku ističa.

5.2.4 Zemná ochrana

Konfigurácia G kontrolného zariadenia umožňuje indikovať polohy uzemňovača. Použitá trojica špičiek konektoru X110 je v prípade indikácie stavu uzemňovača č. 11, 12, 13. Špička č. 13 je v konfigurácii trvalo spojená so zemou. Pre indikáciu zapnutej polohy sa privedie vysoká úroveň napätia na špičku č. 11 a nízka úroveň na špičku č. 12. V prípade indikovania vypnutej polohy sa na obidve špičky privedie vysoká úroveň. Zobrazenie stavov v kontrolnom zariadení pre vypnutý (a) a zapnutú polohu (b) je zobrazené na obrázku 5.9.



(a) Vypnutá poloha



(b) Zapnutá poloha

Obr. 5.9: Indikácia polôh uzemňovača.

Záver

Bakalárska práca na tému Emulátor senzorových zařízení pro průmyslové sítě sa zaoberá rozborom priemyselných sietí a spôsobom ich monitorovania a ochrany. Po štúdiu reálnych signálov a spôsoboch ich spracovania pre vyhodnocovacie zariadenia je prístupné k návrhu emulátoru týchto reálnych veličín pre potreby demonštrácie energetickej siete v školských podmienkach v laboratóriu.

Následne sú opísané základné komponenty, ktoré sú použité pri návrhu a stavbe emulátora. Základná ovládacia časť je použitá platforma Arduino, mikrokontrolér, slúžiaci na spracovanie príkazov od používateľa, ovládanie prvkov pre samotnú simuláciu a generovanie sínusového signálu. Celkovo sú použité dva kusy zariadenia, prvé zariadenie sa používa ako riadiaca jednotka a druhé zariadenie ako generátor PWM signálu, z ktorého sa v príslušných obvodoch vytvára sínusový signál. Generátor dokáže ovplyvňovať frekvenciu generovaného signálu. Návrhy jednotlivých zosilňovacích stupňov sú realizované pomocou operačných zosilňovačov, ovládanie veľkostí veličín zabezpečujú digitálne potenciometre. Nastavenie digitálnych binárnych vstupov zabezpečujú sériovo-paralelné registre.

Dôležitou súčasťou emulátoru je ovládacie grafické rozhranie slúžiace na ovládanie emulátoru pomocou počítača. Emulátor podporuje ovládanie pomocou USB portu a pomocou ethernetového rozhrania. Ethernetové pripojenie sa realizuje pomocou ethernetového modulu pripojeného do lokálnej siete. Na komunikáciu s mikrokontrolérom sa používa komunikačný reťazec, ktorý sa v kontroléri dekoduje a na základe informácií v ňom obsiahnutých sa nastavujú výstupy emulátoru. Webové a terminálové rozhrania umožňujú nastavenie výstupov binárnych hodnôt, nastavenie veľkostí napätí a prúdov, odpájanie a zapájanie jednotlivých fáz napätia a prúdu, nastavenie kritických stavov siete a simuláciu scenárov.

V poslednej kapitole sú zahrnuté výsledky testov funkcií emulátora pomocou vyhodnocovacieho zariadenia REF 615 od ABB. Postupne sú ukázané výsledky simulácie normálnej prevádzky, skratu jednej fázy, prepätia a podpätia v sieti, nastavenie frekvencie a simulácia zariadení s binárnymi výstupnými hodnotami. Na základe týchto testov je dokázané, že emulátor napodobňuje správanie reálnej priemyselnej siete.

Literatúra

- [1] STOUFFER, Keith, Karen KENT a Joseph FALCO. *Guide to Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) and Industrial Control Systems Security* [online]. USA, 2006 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/246350235_Guide_to_Supervisory_Control_and_Data_Acquisition_SCADA_and_Industrial_Control_Systems_Security
- [2] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 3, KVALITA NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ, ZPŮSOBY JEJÍHO ZJIŠŤOVÁNÍ A HODNOCENÍ* [online]. 2011 [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: https://www.cezlds.cz/_files/f336/files/cez/ppds-2011_priloha-3.pdf
- [3] Proudové/napětové senzory vnitřního provedení. *ABB Group* [online]. Zürich: ABB Group, 2020, 2020 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://new.abb.com/medium-voltage/cs/zarizeni/pristrojove-transformatory-a-senzory/pristroje/proudov%C3%A9-nap%C4%B5%C5%A5ov%C3%A9-senzory-vnit%C5%99n%C3%ADho-proveden%C3%AD>
- [4] Indoor combined sensors KEVCD. *ABB Group* [online]. Zürich: ABB Group, 2020 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/instrument-transformers-and-sensors-id/products/sensors-new/indoor-combined-sensors-kevcd>
- [5] Feeder protection and control REF615 IEC. *ABB Group* [online]. Zürich: ABB Group, 2020, 2020 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/feeder-protection-and-control/relion-for-medium-voltage/feeder-protection-and-control-ref615-iec>
- [6] *Feeder Protection and Control REF615 Application Manual* [online]. Zurich: ABB, 2010 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/f49c47babe06a298c1257b2f0054c256/REF615_appl_756378_ENk.pdf
- [7] STEINBAUER, Miloslav a Pavel KALÁB. *Bezpečnost v elektrotechnice* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://www.utee.fekt.vut.cz/sites/default/files/inline-files/bbz.pdf>
- [8] *VN odpínač a pojistkový odpínač pro vnitřní montáž* [online]. Brno: ABB, 2020 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A3267&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch>

- [9] *EK6 Uzemňovač 12 KV / 25 kV* [online]. Brno: ABB, 2019 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VLC000025%20R2%20CS&LanguageCode=cs&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [10] SELECKÝ, Matúš. *Arduino: uživatelská příručka*. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
- [11] A Comparison of Popular Arduino Boards. In: *Maker Pro* [online]. Boise: EETech Media, 2020 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://maker.pro/storage/I0PDRAK/I0PDRAKhQmwm6yr03C9UVNPb4i4hMPF0tbIZM6vX.jpeg>
- [12] Arduino Uno. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_Uno
- [13] Arduino Nano Pin Diagram. In: *Components101* [online]. 2018 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://components101.com/sites/default/files/component_pin/Arduino-Nano-Pinout.png
- [14] VRBA, Kamil. *Analogová technika - numerická cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN 978-80-214-4727-1.
- [15] *Single/Dual Digital Potentiometer with SPI Interface* [online]. In: . s. 32 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/11195c.pdf>
- [16] *74HC595; 74HCT595* [online]. In: . Koninklijke: Philips Electronics, 2003, s. 28 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://datasheet.octopart.com/74HC595N-Philips-datasheet-18647.pdf>
- [17] Impulzová šířková modulácia. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Impulzov%C3%A1_%C5%A1%C3%ADrkov%C3%A1_modul%C3%A1cia

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

A0	označenie analógového výstupu
A_U	zosilnenie
BI	binárny vstup - Binary Input
CSV	hodnoty oddelené čiarkami - Comma-Separated Values
č.	číslo
D2	označenie digitálneho výstupu
DS	dátový vstup registra - Serial Data Input
F_n	menovitá frekvencia
GND	zem - Ground
HTML	značkovací jazyk - Hypertext Markup Language
Hz	hertz
I²C	počítačová sériová zbernica - Inter-Integrated Circuit
I_{cth}	menovitý nepretržitý tepelný prúd
i_p	primárny prúd
IP	internetový protokol - Internet Protocol
I_{pr}	menovitý primárny prúd
I_{th}	menovitý nárazový tepelný prúd
K_n	transformačný pomer
kΩ	kiloohm
K_{ra}	transformačný pomer pre 50 a 60 Hz
K_u	napäťový faktor
kV	kilovolt
LED	Light Emitting Diode
LSB	najmenej významný bit - Least Significant Bit
M	vzájomná indukčnosť cievok
μF	mikrofarad
ms	milisekunda
mV	milivolt
MSB	najviac významný bit - Most Significant Bit
nF	nanofarad
Ω	ohm
PWM	pulzno-šírková modulácia - Pulse-Width Modulation
Q_0	označenie výstupu registra
R_{br}	menovitá záťaž
R_1	označenie rezistorov
REF	referenčná hodnota
RX	prijímač - Receiver

SDA dátový kanál - Synchronous Data

SCADA dispečerské riadenie a zber dát - Supervisory Control And Data Acquisition

SCL hodinový kanál - Synchronous Clock

SH_CP hodinový vstup registra - Shift Register Clock Input

SPI sériové periférne rozhranie - Serial Peripheral Interface

ST_CP povolovací vstup registra - Storage Register Clock Input

T_P trieda presnosti

TX vysielač - Transmitter

UART univerzálny asynchrónny prijímač-vysielač - Universal asynchronous receiver-transmitter

USB univerzálna sériová zbernica - Universal Serial Bus

U_p primárne napätie

U_s sekundárne napätie

u_s sekundárne napätie

V volt

VIN externý napájací pin

VN vysoké napätie

Zoznam príloh

A	Obsah priloženého súboru	65
B	Dosky plošných spojov	66
B.1	Zosilňovací stupeň	66
B.2	Modul výstupných binárnych hodnôt	66
B.3	Riadiaca jednotka	67
C	Fotodokumentácia	68

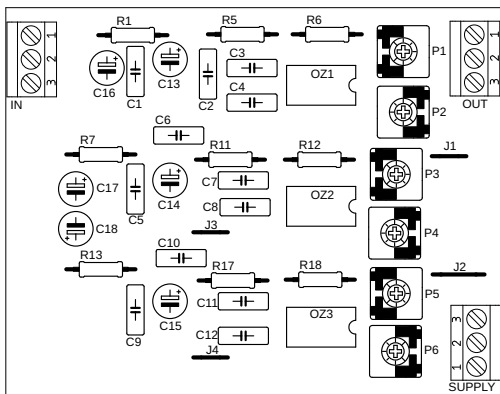
A Obsah priloženého súboru

prilohy	koreňový adresár
└─ Generator.ino	PWM generátor
└─ Ovladacia_jednotka.ino	Ovládacia jednotka Arduino
└─ DPS	Dosky plošných spojov
└─ Binárne_výstupy	
└─ binarne_vystupy.brd	
└─ binarne_vystupy.sch	
└─ Základná_doska	
└─ zakladna_doska.brd	
└─ zakladna_doska.sch	
└─ Zosilňovač	
└─ zosilnovac.brd	
└─ zosilnovac.sch	
└─ Terminálové_rozhraňovanie	
└─ Terminal.jar	spustiteľný program terminálu
└─ Terminal.zip	zdrojový kód terminálu
└─ Webové_rozhraňovanie	
└─ Web.zip	zdrojový kód webového rozhrania

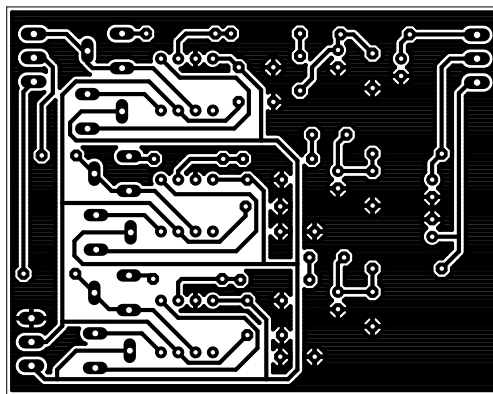
B Dosky plošných spojov

B.1 Zosilňovací stupeň

Skutočné rozmery dosky 72,82 x 57,14 mm.



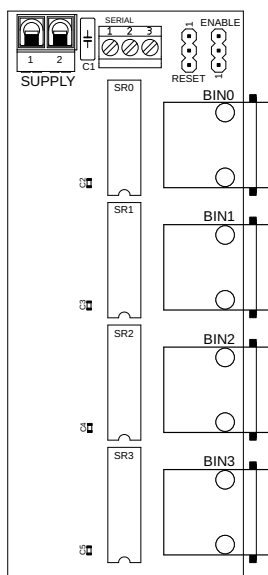
Obr. B.1: Osadzovací výkres.



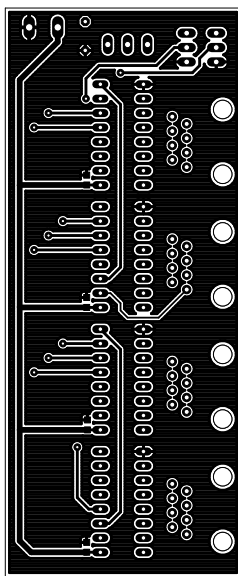
Obr. B.2: Strana spojov.

B.2 Modul výstupných binárných hodnôt

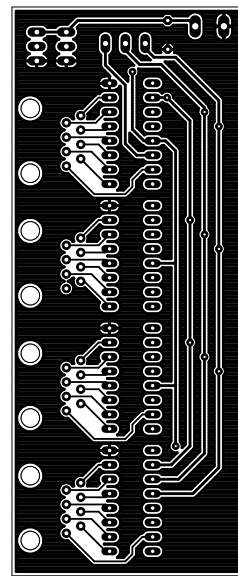
Skutočné rozmery dosky 41,58 x 100,32 mm.



Obr. B.3: Osadzovací výkres.



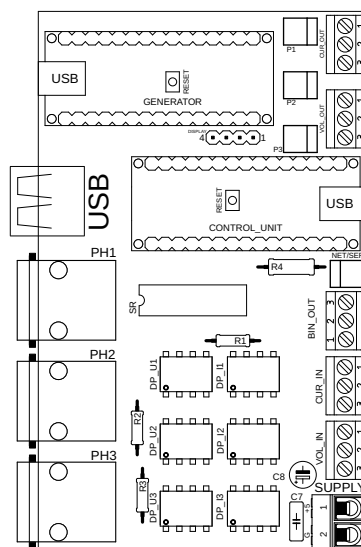
Obr. B.4: TOP.



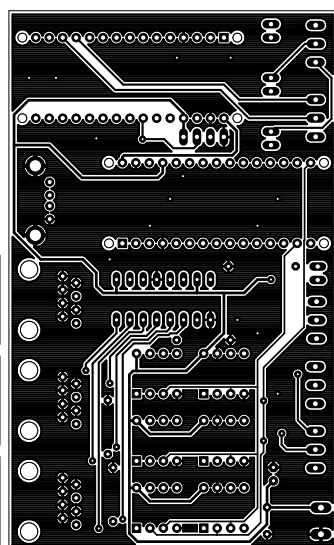
Obr. B.5: BOT.

B.3 Riadiaca jednotka

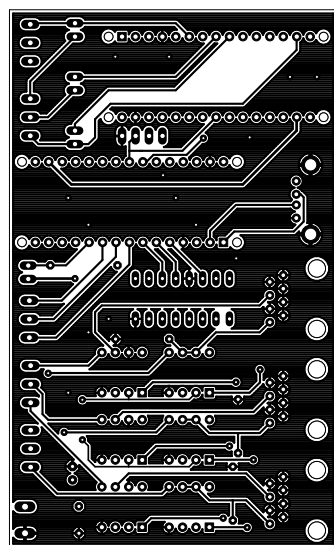
Skutočné rozmery dosky 61,90 x 101,59 mm.



Obr. B.6: Osadzovací výkres.

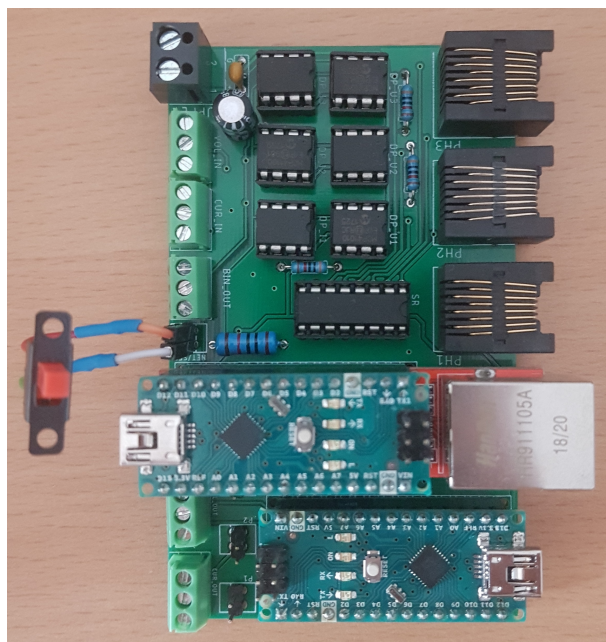


Obr. B.7: Strana spojov TOP.

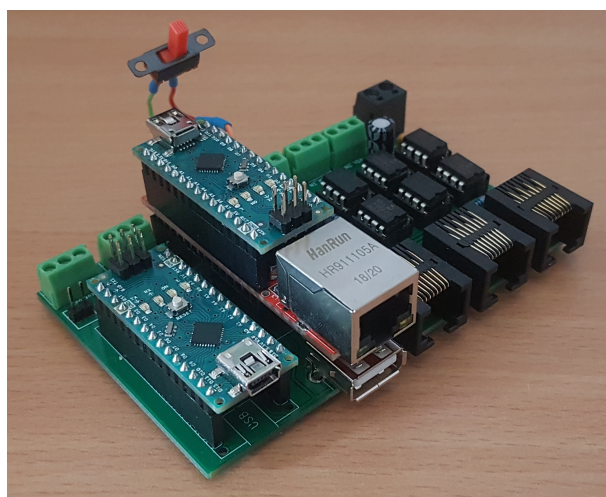


Obr. B.8: Strana spojov BOT.

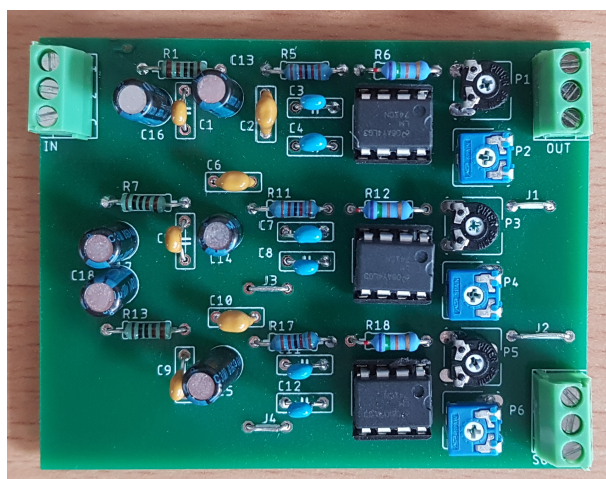
C Fotodokumentácia



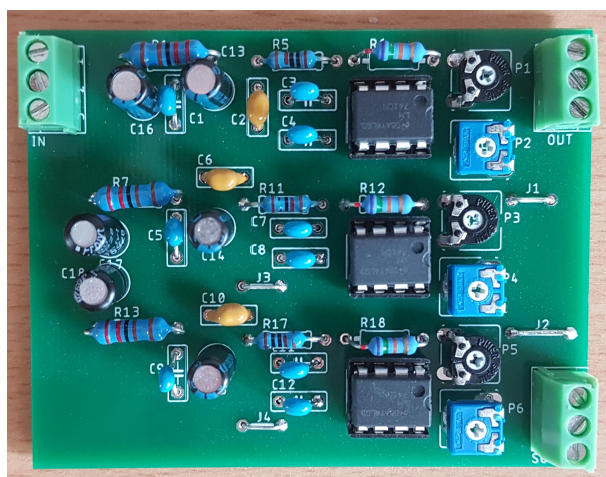
Obr. C.1: Doska plošných spojov - riadiaca jednotka.



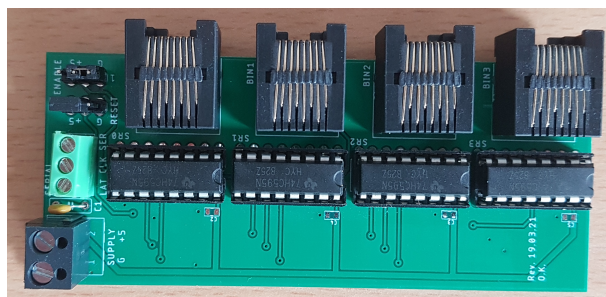
Obr. C.2: Doska plošných spojov - riadiaca jednotka, druhý pohľad.



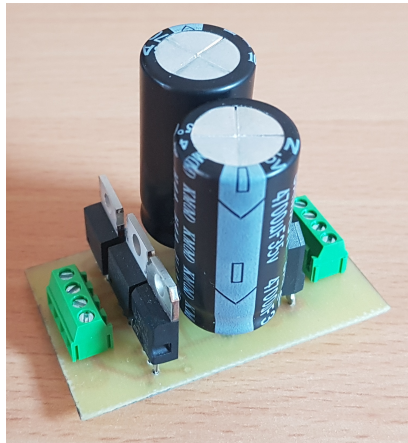
Obr. C.3: Doska plošných spojov - zosilňovač simulovaného napätia.



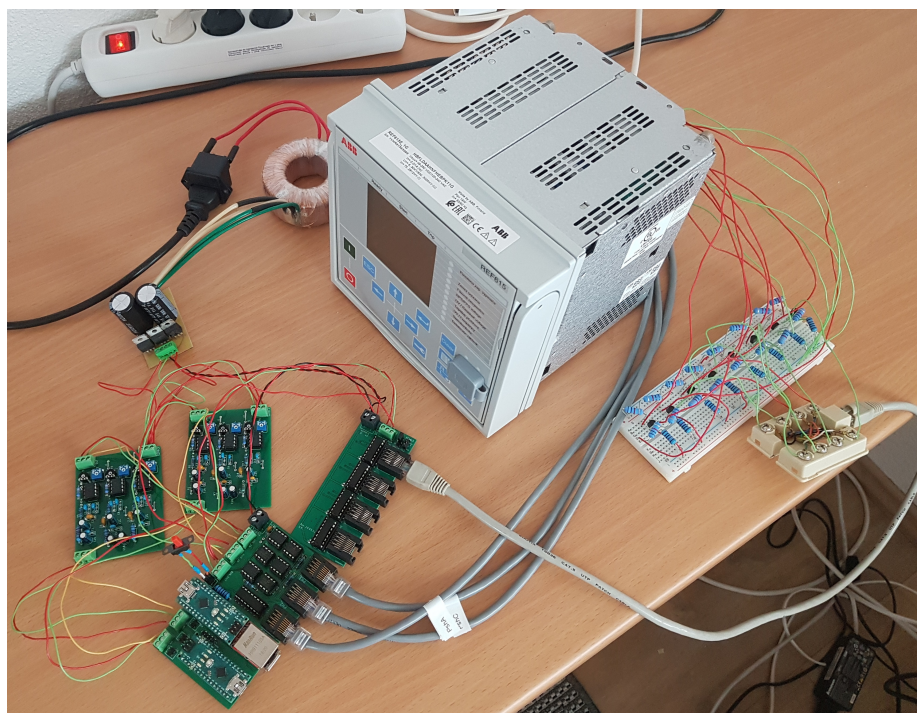
Obr. C.4: Doska plošných spojov - zosilňovač simulovaného prúdu.



Obr. C.5: Doska plošných spojov - binárne výstupy.



Obr. C.6: Napájací zdroj.



Obr. C.7: Zapojenie pracoviska.